

# Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/JP05/004839

International filing date: 17 March 2005 (17.03.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: JP  
Number: 2004-077215  
Filing date: 17 March 2004 (17.03.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 14 April 2005 (14.04.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland  
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

24.3.2005

日 本 国 特 許 庁  
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日            2 0 0 4 年   3 月 1 7 日  
Date of Application:

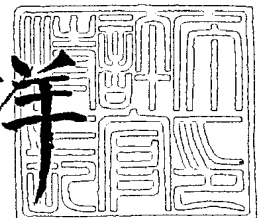
出 願 番 号            特 願 2 0 0 4 - 0 7 7 2 1 5  
Application Number:  
[ST. 10/C] :            [ J P 2 0 0 4 - 0 7 7 2 1 5 ]

出   願   人            ソニー株式会社  
Applicant(s):

2 0 0 4 年 1 2 月   8 日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

小 川 洋



出証番号   出証特 2 0 0 4 - 3 1 1 2 1 5 0

【書類名】 特許願  
【整理番号】 0390908803  
【提出日】 平成16年 3月17日  
【あて先】 特許庁長官 今井 康夫 殿  
【国際特許分類】 G06T 7/00  
【発明者】  
    【住所又は居所】 東京都品川区北品川 6 丁目 7 番 3 5 号 ソニー株式会社内  
    【氏名】 ステフェン グットマン  
【発明者】  
    【住所又は居所】 東京都品川区北品川 6 丁目 7 番 3 5 号 ソニー株式会社内  
    【氏名】 福地 正樹  
【発明者】  
    【住所又は居所】 東京都品川区北品川 6 丁目 7 番 3 5 号 ソニー株式会社内  
    【氏名】 佐部 浩太郎  
【発明者】  
    【住所又は居所】 東京都品川区北品川 6 丁目 7 番 3 5 号 ソニー株式会社内  
    【氏名】 河本 献太  
【特許出願人】  
    【識別番号】 000002185  
    【氏名又は名称】 ソニー株式会社  
【代理人】  
    【識別番号】 100067736  
    【弁理士】  
    【氏名又は名称】 小池 晃  
【選任した代理人】  
    【識別番号】 100086335  
    【弁理士】  
    【氏名又は名称】 田村 榮一  
【選任した代理人】  
    【識別番号】 100096677  
    【弁理士】  
    【氏名又は名称】 伊賀 誠司  
【手数料の表示】  
    【予納台帳番号】 019530  
    【納付金額】 21,000円  
【提出物件の目録】  
    【物件名】 特許請求の範囲 1  
    【物件名】 明細書 1  
    【物件名】 図面 1  
    【物件名】 要約書 1  
    【包括委任状番号】 9707387

**【書類名】 特許請求の範囲****【請求項 1】**

3次元の距離データから平面を検出する平面検出装置において、  
3次元空間で同一平面上にあると推定される距離データ点群毎に線分を抽出する線分抽出手段と、

上記線分抽出手段によって抽出された線分群から同一平面に属すると推定される複数の線分を抽出し該複数の線分から平面を算出する平面領域拡張手段とを有し、

上記線分抽出手段は、距離データ点の分布に応じて適応的に線分を抽出することを特徴とする平面検出装置。

**【請求項 2】**

上記線分抽出手段は、上記距離データ点間の距離に基づき同一平面上にあると推定される距離データ点群を抽出し、該距離データ点群における距離データ点の分布に基づき、当該距離データ点群が同一平面上にあるか否かを再度推定する

ことを特徴とする請求項 1 記載の平面検出装置。

**【請求項 3】**

上記線分抽出手段は、上記同一平面上にあると推定される距離データ点群から線分を抽出し、該距離データ点群のうち該線分との距離が最も大きい距離データ点を着目点とし、当該距離が所定の閾値以下である場合に該距離データ点群における距離データ点の分布に偏りがあるか否かを判別し、偏りがある場合には該着目点にて該距離データ点群を分割する

ことを特徴とする請求項 1 記載の平面検出装置。

**【請求項 4】**

上記線分抽出手段は、上記同一平面上にあると推定される距離データ点群から第 1 の線分を抽出し、該距離データ点群のうち該第 1 の線分との距離が最も大きい距離データ点を着目点とし、当該距離が所定の閾値以下である場合に該距離データ点群から第 2 の線分を抽出し、該第 2 の線分の一方側に距離データ点が所定の数以上連続して存在するか否かを判定し、所定の数以上連続して存在する場合に該距離データ点群を該着目点にて分割する

ことを特徴とする請求項 1 記載の平面検出装置。

**【請求項 5】**

上記線分抽出手段は、上記第 1 の線分を求めた距離データ点群の標準偏差が所定の閾値以上である場合には、当該距離データ点群を分割する

ことを特徴とする請求項 4 記載の平面検出装置。

**【請求項 6】**

上記平面領域拡張手段は、同一の平面に属すると推定される 1 以上の線分を選択して基準平面を算出し、該基準平面と同一平面に属すると推定される線分を該線分群から拡張用線分として検索し、該拡張用線分により該基準平面を更新すると共に該基準平面の領域を拡張する処理を繰り返し、更新が終了した平面を更新済平面として出力する

ことを特徴とする請求項 1 記載の平面検出装置。

**【請求項 7】**

上記更新済平面に属する距離データ点群において、当該更新済平面との距離が所定の閾値を超える距離データ点が存在する場合、これを除いた距離データ点群から再度平面を算出する平面再算出手段を更に有する

ことを特徴とする請求項 6 記載の平面検出装置。

**【請求項 8】**

上記平面領域拡張手段は、線分により定まる平面と上記基準平面との誤差に基づき当該線分が該基準平面と同一平面に属するか否かを推定する

ことを特徴とする請求項 6 記載の平面検出装置。

**【請求項 9】**

上記線分抽出手段は、上記同一平面上にあると推定される距離データ点群から最小二乗法により上記第 2 の線分を生成する

ことを特徴とする請求項 4 記載の平面検出装置。

【請求項 10】

上記線分抽出手段は、2つの撮像手段による視差によって距離を計測する距離計測手段により計測された3次元の距離データを使用して線分抽出する

ことを特徴とする請求項 1 記載の平面検出装置。

【請求項 11】

上記線分抽出手段は、レーザー距離計測計により計測された3次元の距離データを使用して線分抽出する

ことを特徴とする請求項 1 記載の平面検出装置。

【請求項 12】

3次元の距離データから平面を検出する平面検出方法において、

3次元空間で同一平面上にあると推定される距離データ点群毎に線分を抽出する線分抽出工程と、

上記線分抽出工程にて抽出された線分群から同一平面に属すると推定される複数の線分を抽出し該複数の線分から平面を算出する平面領域拡張工程とを有し、

上記線分抽出工程では、距離データ点の分布に応じて適応的に線分を抽出する

ことを特徴とする平面検出方法。

【請求項 13】

上記線分抽出工程では、上記距離データ点間の距離に基づき同一平面上にあると推定される距離データ点群を抽出し、該距離データ点群における距離データ点の分布に基づき、当該距離データ点群が同一平面上にあるか否かを再度推定する

ことを特徴とする請求項 12 記載の平面検出方法。

【請求項 14】

上記線分抽出工程では、上記同一平面上にあると推定される距離データ点群から線分を抽出し、該距離データ点群のうち該線分との距離が最も大きい距離データ点を着目点とし、当該距離が所定の閾値以下である場合に該距離データ点群における距離データ点の分布に偏りがあるか否かを判別し、偏りがある場合には該着目点にて該距離データ点群を分割する

ことを特徴とする請求項 13 記載の平面検出方法。

【請求項 15】

上記線分抽出工程では、上記同一平面上にあると推定される距離データ点群から第1の線分を抽出し、該距離データ点群のうち該第1の線分との距離が最も大きい距離データ点を着目点とし、当該距離が所定の閾値以下である場合に該距離データ点群から第2の線分を抽出し、該第2の線分の一方側に距離データ点が所定の数以上連続して存在するか否かを判定し、所定の数以上連続して存在する場合に該距離データ点群を該着目点にて分割する

ことを特徴とする請求項 13 記載の平面検出方法。

【請求項 16】

上記平面領域拡張工程では、同一の平面に属すると推定される1以上の線分を選択して基準平面を算出し、該基準平面と同一平面に属すると推定される線分を該線分群から拡張用線分として検索し、該拡張用線分により該基準平面を更新すると共に該基準平面の領域を拡張する処理を繰り返し、更新が終了した平面を更新済平面として出力する

ことを特徴とする請求項 12 記載の平面検出方法。

【請求項 17】

上記更新済平面に属する距離データ点群において、当該更新済平面との距離が所定の閾値を超える距離データ点が存在する場合、これを除いた距離データ点群から再度平面を算出する平面再算出工程を更に有する

ことを特徴とする請求項 16 記載の平面検出方法。

【請求項 18】

上記平面領域拡張工程では、線分により定まる平面と上記基準平面との誤差に基づき当

該線分が該基準平面と同一平面に属するか否かを推定すること  
ことを特徴とする請求項 1 6 記載の平面検出方法。

【請求項 1 9】

自律的に行動するロボット装置において、  
3 次元の距離データを取得する距離計測手段と、  
3 次元の距離データから平面を検出する平面検出装置と、  
上記平面検出装置による平面検出結果に基づき行動を制御する行動制御手段とを有し、  
上記平面検出装置は、  
3 次元空間で同一平面上にあると推定される距離データ点群毎に線分を抽出する線分抽出手段と、  
上記線分抽出手段によって抽出された線分群から同一平面に属すると推定される複数の線分を抽出し該複数の線分から平面を算出する平面領域拡張手段とを有し、  
上記線分抽出手段は、距離データ点の分布に応じて適応的に線分を抽出すること  
ことを特徴とするロボット装置。

【請求項 2 0】

対象物に対して模様を付与する模様付与手段を有すること  
ことを特徴とする請求項 1 9 記載のロボット装置。

【請求項 2 1】

上記模様付与手段は、上記 3 次元の距離データを取得する際に上記対象物に模様を投射する投射手段である  
ことを特徴とする請求項 2 0 記載のロボット装置。

## 【書類名】明細書

【発明の名称】平面検出装置、平面検出方法、及び平面検出装置を搭載したロボット装置

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、3次元距離データから平面を検出する平面検出装置、平面検出方法及び平面検出装置を搭載したロボット装置に関し、特に、線分拡張法(scan line grouping)により平面を検出する平面検出装置、平面検出方法及びロボット装置に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

3次元の距離情報から平面を検出するアルゴリズムについては様々な研究が行われている。検出された平面は、例えば移動式のロボット装置の障害物回避、または階段昇降動作の用途とすることができる。

## 【0003】

一般に、距離情報から平面を検出する手法は、以下の手順により構成されている。

1. 3次元距離情報を取得する
2. 複数の平面に分割する
3. 各平面に関して、重心、平面方程式、境界等を計算する
4. 2、3の処理を繰り返し行い、最適な分割方法を獲得する

例えば、図29(a)に示す床面に載置された階段を有する画像は、図29(b)に示すように、4つの平面領域A、B、C、Dに分割される。ここで、領域Aは床部分、領域B、C、Dは階段部分を示す。

## 【0004】

次に、3次元の距離情報から平面を検出する従来の手法を下記非特許文献1乃至非特許文献4の技術を例にとって説明する。例えば、非特許文献1では、距離情報から参照点をランダムにサンプルし、その点から空間的に近傍の点を連結することによって平面を検出する手法を提案している。また、非特許文献2では、距離情報からハフ変換によって統計的に平面を検出する手法を提案している。更に、非特許文献3では、距離情報からランダムに選んだ3点を平面方程式に当てはめ、統計的に平面を検出するラングマイズドハフ変換による手法を提案している。更にまた、非特許文献4では、距離画像中の列に並んだ点群はそれらの点が3次元空間で同一平面上にあるならば、空間内で直線となることを利用し、線分拡張法(scan line grouping)による手法を提案している。

## 【0005】

【非特許文献1】Hooverら(A. Hoover, G. Jean-Baptiste, X. Jiang, P.J. Flynn, H. Bunke, D. Goldgof, K. Bowyer, D. Eggert, A. Fitzgibbon, and R. Fisher.), 「距離画像セグメンテーションアルゴリズムの実験的比較(An experimental comparison of range image segmentation algorithms)」, Transaction on Pattern Analysis Machine Intelligence, 18(7), 1996

【非特許文献2】Iocchiら(L. Iocchi, K. Konolige, and M. Bajracharya.), 「ステレオ画像を使用した環境平面における現実の視覚地図(Visually realistic mapping of planar environment with stereo)」Int. Symposium on Experimental Robotics (ISER), 2000.

【非特許文献3】おかだら(K. Okada, S. Kagami, M. Inaba and H. Inoue. 「平面セグメントの検索アルゴリズム, 実装, アプリケーション(Plane Segment Finder: Algorithm, Implementation, and Applications)」Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), 2001.

【非特許文献4】Jiangら(X.-Y. Jiang and H. Bunke.) 「線分拡張法によって距離画像を平面領域に高速に分割する手法(Fast segmentation of range images into planar regions by scan line grouping)」Machine Vision and Applications, 7(2), P115-122, 1994.

## 【発明の開示】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0006】

ところで、上述の非特許文献1乃至4などのように、距離情報を使用した平面検出において重大な問題となるのが、ノイズに起因する、under-segmentation, over-segmentationの問題である。

## 【0007】

under-segmentationとは、実際は複数の平面が存在するのにも拘わらず、ノイズの影響などによりそれらを例えば平均化したような1つの平面として認識してしまうことをいい、over-segmentationとは、実際は1つの同一平面であるのにも拘わらず、ノイズの影響などにより複数の異なる平面として認識してしまうものである。

## 【0008】

図30に示すように、カメラ401R/Lにより取得された距離画像には、複数の踏面や、側面、床面などが含まれる。例えば図30の上図に示すように、例えばカメラ401R/Lの視野内に階段400が存在する場合、距離画像内には複数の平面を含む。したがって、図30下図に示すように、 $x-z$ 平面であれば、踏面402、側面403などの複数の平面を含むが、under-segmentationにより、これら複数の平面を区別できず、一つの平面403として検出してしまう。平面検出器は、一般に、平面の検出要求精度に比べてノイズの影響が大きい計測データから平面を検出するため、これを設計する際には、複数平面に分離する為の閾値を甘くしなければならず、従ってこのようなunder-segmentationの問題が起こりやすい。また、逆に、ノイズの影響が大きい計測データの場合に閾値を下げると、実際には一つの平面が複数の平面に分離されてしまうover-segmentationが起こる。

## 【0009】

上述の非特許文献1、非特許文献2などのように、ハフ変換によって平面を推定する手法の場合、under-segmentationの問題が非常に生じやすい。図31(a)乃至図31(d)は、ハフ変換により平面を抽出する方法を説明する図であり、それぞれ階段を示す図、(a)に示す階段から得られた3次元距離データ、(b)の距離データをハフ変換してピークを求めた図、(c)に示すピークが示す平面と、実際の平面との比較を示す図である。図31に示すように、視野内に階段410を含む場合、その3次元データは、図31(b)に示すものとなる。このデータの3点をランダムに選択して平面を求め、これを平面パラメータ空間に投票することでヒストグラムを生成し、図31(c)に示すように支配的な平面がピークPとして検出でき、このピークが示すパラメータによって決定される平面が視野内に存在する平面として推定される。

## 【0010】

しかしながら、ハフ変換した後のデータから統計的に平面を推定すると、under-segmentationした結果が統計的に最も支配的な値となる。すなわち、図31(d)に示すように、検出された平面411は、実際には全ての平面412、413、414を均した平面として求まってしまう。このように、ハフ変換は、視野内に含まれる支配的な平面を推定、検出することはできても、複数平面が存在する場合にそれらを精度よく検出することができない。

## 【0011】

また、非特許文献4には、線分拡張法(scan line grouping)による平面抽出手法が開示されている。線分拡張法による平面検出では、まず、撮影された画像から3次元距離データを取得し、この3次元距離データにおいて、行方向または列方向のデータ列(image row: イメージロウ)毎に以下の処理を行う。例えば、画像内の行方向のデータ列において、3次元空間において同一の平面に属するならば同一の直線となるとことを利用し、同一平面に属するデータ点群から線分を生成する。そして、生成された線分群において、同一平面を構成する隣接する3本の線分を抽出して基準となる平面を求め、この基準となる平面に隣接する線分が同一平面に属する場合に当該隣接する線分によって基準となる平面の領域を拡大すると共に基準となる平面を更新することにより、平面を検出する方法であ



る。

#### 【0012】

図32は、線分拡張法による平面検出処理を示すフローチャートである。図32に示すように、まず、距離画像を入力し（ステップS41）、距離画像を構成する行方向又は列方向の各データ列において同一の平面上にあると推定されるデータ点群から線分を生成する（ステップS42）。そして、生成された線分群の中から平面の種となる領域（以下、領域種（seed region）という。）を検索し、該当する領域種を選択する（ステップS43, S44）。この選択においては、上下隣接する1ラインが同一平面にあることを条件とする。そして、選択した3本の線分からなる領域種が属する平面を3本の線分から平均して求めておく。

#### 【0013】

そして、ステップS3にて選択した領域種に隣接するデータ列において、その領域種と同一平面にある線分があるか否かを検索する。同一平面にあるか否かは、空間的な距離を比較することで判断する。同一平面にあると判断された線分が存在する場合には、当該線分をこの領域種の領域に追加し（領域拡張処理）、追加した線分を含めたものとして、元の平面を更新し（平面更新処理）、これらの処理を繰り返し行ことで、領域を拡張すると共に平面を更新する（ステップS45）。更に、ステップS43～S45の処理を、種となる領域が存在しなくなるまで繰り返し実行する。最後に、得られた複数の領域群の中から同一平面を構成するものを連結し（ステップS46）、処理を終了する。

#### 【0014】

この図32に示す各処理について更に詳細に説明する。まず、ステップS2に示す線分抽出方法について説明する。図33は、線分を抽出する処理を説明する図であって、（a）乃至（c）は、その処理工程順に示す図である。図33（a）に示すように、まず、与えられた複数のデータ点群430の両端430a, 430bを結ぶ線分（弦）を生成する。そして、得られた線分431との距離が最も大きいデータ点を検索する。検索されたデータ点430cと線分431との距離dがある閾値を超える場合には、線分431を分割する処理を行う。具体的には、図33（b）に示すように、線分431を、左端のデータ点430aと分割点となるデータ点430cとを結ぶ線分431aと、分割点430cと右端のデータ点430bとを結ぶ線分431bとに分割する。これを全ての点と線分との距離が閾値以下になるまで繰り返すことによって、与えられたデータにフィットした複数の線分を検出することができる。ここでは、図33（c）に示すように、最終的に2箇所の分割点となるデータ点430c, 430dが選択され、線分431は、線分431a, 431c, 431dの3本の線分に分割される。

#### 【0015】

図19は、ステップS45に示す領域拡張処理を説明するための図である。上述の線分抽出処理によって得られた線分を、種となる領域から順次統合していくことによって領域を分割することができる。例えば、図19に示すように、画像30内に複数の平面からなる階段31が存在する場合、例えば太線で示す32a～32cの3本の線分が領域種として選択されたとする。これら3本の線分32a～32cからなる領域が領域種となる。まず、この3つの線分32a～32cにより1つの平面（基準平面）Pを求める。次に、領域種の最も外側の線分32a又は32cに領域種外にて隣接するそれぞれデータ列33又は34において、平面Pと同一の平面である線分を選択する。ここでは、線分33aが選択されたとする。次に、これら4本の線分群からなる平面P'を求め、基準平面Pを更新する。次に、線分34aが選択されれば、5本の線分群からなる平面P''を求め、平面P'を更新する。これを繰り返すことにより、階段31の2段目の踏面が、破線で囲まれる平面45として求められる。このようにして、選択された領域種を種として追加する線分がなくなるまで領域拡大処理する。そして、追加する線分がなくなった場合、再び画像30内から領域種となる3つの線分を検索して領域拡大処理を実行するというような処理を繰り返し、領域種となる3つの線分がなくなるまで図32のステップS43～S45の処理を繰り返す。

## 【0016】

しかしながら、この線分拡張法による平面検出アルゴリズムにおいても、線分抽出の際の閾値の決定が非常に困難であるため、計測データのノイズの影響を排除することが極めて難しい。図34は、2つの閾値設定をした場合における線分抽出処理の結果の相違を示す図である。図34(a)は、ノイズが少ない計測データ点群450の場合、図34(b)は、ノイズが多い計測データ点群460の場合であり、それぞれの場合において、上述の線分分割の際の閾値として大きい値(Large threshold)を適用した場合と、小さい値(Small threshold)を適用した場合の結果を示す。

## 【0017】

図34(a)に示すように、ノイズが少ない計測データ点群450から線分を抽出する場合、大きな閾値を設定するとunder-segmentationが生じてしまうため、小さい閾値のときの方がよい抽出結果を示す。一方、図34(b)に示すように、ノイズが多いデータ点群460から線分を抽出する場合は、小さな閾値を設定すると、over-segmentationの問題が発生してしまうため、大きな閾値を設定する必要がある。すなわち、小さい閾値ではノイズの影響を受けて線分が過剰に細かく分割されてしまい、本来抽出すべき線分を抽出することができない。

## 【0018】

一般に、ステレオビジョンなどの距離計測装置の場合、近くの計測データに関しては計測精度が高くノイズが少ない計測データを取得することができ、遠くの計測データに関しては、計測精度が低いためノイズが多い計測データとなってしまう。このため、距離に応じて適応的に閾値を決めることが望まれるが、環境による計測精度の違いの影響もあり、これを一意に決めるのは極めて困難である。

## 【0019】

以上、まとめると、ランダムイズドハフ変換などによる平面検出は、支配的な平面を検出するには適しているが、階段など複数平面を含むデータから複数の平面を検出するには、under-segmentationの問題が生じてしまうという問題点があり、また線分拡張法を使用して平面を抽出する場合は、線分抽出の際の閾値の設定が難しく、over-segmentation及びunder-segmentationの問題が生じてしまい、いずれの方法においても、距離計測データから正確に平面を検出することが困難であるという問題点がある。

## 【0020】

本発明は、このような従来の実情に鑑みて提案されたものであり、計測ノイズを含む距離データからノイズに対してロバストにかつ複数平面を同時に正確に検出することができる平面検出装置、平面検出方法、及び平面検出装置を搭載したロボット装置を提供することを目的とする。

## 【課題を解決するための手段】

## 【0021】

上述した目的を達成するために、本発明に係る平面検出装置は、3次元の距離データから平面を検出する平面検出装置において、3次元空間で同一平面上にあると推定される距離データ点群毎に線分を抽出する線分抽出手段と、上記線分抽出手段によって抽出された線分群から同一平面に属すると推定される複数の線分を抽出し該複数の線分から平面を算出する平面領域拡張手段とを有し、上記線分抽出手段は、距離データ点の分布に応じて適応的に線分を抽出することを特徴とする。

## 【0022】

本発明においては、線分抽出手段は、3次元の距離データが同一平面上にある場合同一直線上に並ぶことを利用して線分を抽出するが、この際、ノイズなどの影響により距離データ点の分布に違いが生じるため、この距離データの分布に応じて適応的に線分を抽出する(Adaptive Line Fitting)ことにより、ノイズに対してロバストに、精確な線分抽出を可能とし、抽出された多数の線分から線分拡張法により平面を求めるため、ノイズの影響などにより、本来複数平面が存在するのに1つの平面としたり、1つの平面しか存在しないのに複数平面としたりすることなく精確に平面抽出することができる。

## 【0023】

また、上記線分抽出手段は、上記距離データ点間の距離に基づき同一平面上にあると推定される距離データ点群を抽出し、該距離データ点群における距離データ点の分布に基づき、当該距離データ点群が同一平面上にあるか否かを再度推定することができ、距離データ点の3次元空間における距離に基づき一旦距離データ点群を抽出しておき、データ点の分布に基づき再度同一平面上にあるか否かを推定することにより精確に線分抽出することができる。

## 【0024】

更に、上記線分抽出手段は、上記同一平面上にあると推定される距離データ点群から線分を抽出し、該距離データ点群のうち該線分との距離が最も大きい距離データ点を着目点とし、当該距離が所定の閾値以下である場合に該距離データ点群における距離データ点の分布に偏りがあるか否かを判別し、偏りがある場合には該着目点にて該距離データ点群を分割することができ、距離データ点の分布に偏りがある場合には、抽出した距離データ点群は同一の平面上にないと判断して着目点にて分割することができる。

## 【0025】

更にまた、上記線分抽出手段は、上記同一平面上にあると推定される距離データ点群から第1の線分を抽出し、該距離データ点群のうち該第1の線分との距離が最も大きい距離データ点を着目点とし、当該距離が所定の閾値以下である場合に該距離データ点群から第2の線分を抽出し、該第2の線分の一方側に距離データ点が所定の数以上連続して存在するか否かを判定し、所定の数以上連続して存在する場合に該距離データ点群を該着目点にて分割することができ、例えば抽出したデータ点群の端点を結ぶ線分を第1の線分とし、上記距離が大きい点が存在する場合には、例えば最小二乗法により第2の線分を生成し、この第2の線分において一方側に連続して複数のデータ点が存在する場合には、データ点群は例えば線分に対してジグザグな形などをとっていることが想定でき、従って抽出したデータ点群には偏りがあると判断して、上記着目点などにてデータ点群を分割することができる。

## 【0026】

また、上記平面領域拡張手段は、同一の平面に属すると推定される1以上の線分を選択して基準平面を算出し、該基準平面と同一平面に属すると推定される線分を該線分群から拡張用線分として検索し、該拡張用線分により該基準平面を更新すると共に該基準平面の領域を拡張する処理を繰り返し、更新が終了した平面を更新済平面として出力することができ、同一平面に属するとされる線分により平面領域拡張処理及び平面更新処理を行うことができる。

## 【0027】

更に、上記更新済平面に属する距離データ点群において、当該更新済平面との距離が所定の閾値を超える距離データ点が存在する場合、これを除いた距離データ点群から再度平面を算出する平面再算出手段を更に有することができ、更新済平面はそれに属する全線分の平均した平面として得られているため、これから大きく外れた距離データ点を除いたデータ点群から再度平面を求めることで、よりノイズなどの影響を低減した検出結果を得ることができる。

## 【0028】

更に、上記平面領域拡張手段は、線分により定まる平面と上記基準平面との誤差に基づき当該線分が該基準平面と同一平面に属するか否かを推定することができ、例えば平面方程式の2乗平均誤差などに基づきノイズの影響であるのか、異なる平面なのかを判別して更に正確に平面検出することができる。

## 【0029】

本発明に係る平面検出方法は、3次元の距離データから平面を検出する平面検出方法において、3次元空間で同一平面上にあると推定される距離データ点群毎に線分を抽出する線分抽出工程と、上記線分抽出工程にて抽出された線分群から同一平面に属すると推定される複数の線分を抽出し該複数の線分から平面を算出する平面領域拡張工程とを有し、上

記線分抽出工程では、距離データ点の分布に応じて適応的に線分を抽出することを特徴とする。

#### 【0030】

本発明に係るロボット装置は、自律的に行動するロボット装置において、3次元の距離データを取得する距離計測手段と、3次元の距離データから平面を検出する平面検出装置と、上記平面検出装置による平面検出結果に基づき行動を制御する行動制御手段とを有し、上記平面検出装置は、3次元空間で同一平面上にあると推定される距離データ点群毎に線分を抽出する線分抽出手段と、上記線分抽出手段によって抽出された線分群から同一平面に属すると推定される複数の線分を抽出し該複数の線分から平面を算出する平面領域拡張手段とを有し、上記線分抽出手段は、距離データ点の分布に応じて適応的に線分を抽出することを特徴とする。

#### 【0031】

また、対象物に対して模様を照射する照射手段などの模様付与手段を有することができ、距離計測手段がステレオカメラなどにより視差を利用して距離画像を取得するものである場合、観察対象となる階段、床面などの対象物が模様（テクスチャ）がない又は不十分であると、うまく距離画像を得ることができないため、この模様付与手段により模様を付与して精確な距離画像を取得することができる。

#### 【発明の効果】

#### 【0032】

本発明に係る平面検出装置及び方法によれば、線分拡張法により平面検出する際、距離データ点の分布に応じて適応的に線分を抽出することで、ノイズを含む距離データであっても精確に線分抽出することができ、この線分を使用して線分拡張法により平面検出することで、極めて精確に平面を検出することができる。

#### 【0033】

また、本発明に係るロボット装置は、上述の平面検出装置を搭載することにより、ロボット装置が具備する距離計測手段にてノイズを含む距離データが取得されても精確に平面検出することができ、ロボット装置の周囲環境内に存在する階段を検出して昇降動作をさせたり、床面の段差などを認識して段差がある床面上を移動することなどが可能となり、更にエンターテインメント性が高まる。

#### 【発明を実施するための最良の形態】

#### 【0034】

以下、本発明を適用した具体的な実施の形態について、図面を参照しながら詳細に説明する。この実施の形態は、本発明を、複数平面を同時に精度よく検出可能な平面検出装置を搭載したロボット装置に適用したものである。

#### 【0035】

本実施の形態における平面検出装置は、ステレオビジョンなどにより得られた距離情報（距離データ）から複数の平面を抽出することができ、計測ノイズに対してロバストな検出を行うことが可能であり、例えば、ロボット装置に搭載すれば、ロボット装置が自身の周囲の環境を正確に認識することができ、例えば階段などの複数平面を含む物体、周囲の状況を認識し、この認識結果に応じて自律的に移動したり、行動したりすることができる。

#### 【0036】

本実施の形態においては、まず、このようなロボット装置の一例として2足歩行タイプのロボット装置を例にとって説明する。このロボット装置は、住環境その他の日常生活上の様々な場面における人的活動を支援する実用ロボットであり、内部状態（怒り、悲しみ、喜び、楽しみ等）に応じて行動できるほか、人間が行う基本的な動作を表出できるエンターテインメントロボット装置である。なお、ここでは、2足歩行型のロボット装置を例にとって説明するが、2足歩行のロボット装置に限らず、4足又は車輪等により移動可能なロボット装置に適用できることはいうまでもない。

#### 【0037】

図1は、本実施の形態におけるロボット装置の概観を示す斜視図である。図1に示すように、ロボット装置201は、体幹部ユニット202の所定の位置に頭部ユニット203が連結されると共に、左右2つの腕部ユニット204R/Lと、左右2つの脚部ユニット205R/Lが連結されて構成されている（但し、R及びLの各々は、右及び左の各々を示す接尾辞である。以下において同じ。）。

#### 【0038】

このロボット装置201が具備する関節自由度構成を図2に模式的に示す。頭部ユニット203を支持する首関節は、首関節ヨー軸101と、首関節ピッチ軸102と、首関節ロール軸103という3自由度を有している。

#### 【0039】

また、上肢を構成する各々の腕部ユニット204R/Lは、肩関節ピッチ軸107と、肩関節ロール軸108と、上腕ヨー軸109と、肘関節ピッチ軸110と、前腕ヨー軸111と、手首関節ピッチ軸112と、手首関節ロール軸113と、手部114とで構成される。手部114は、実際には、複数本の指を含む多関節・多自由度構造体である。ただし、手部114の動作は、ロボット装置201の姿勢制御や歩行制御に対する寄与や影響が少ないので、本明細書では簡単のため、ゼロ自由度と仮定する。したがって、各腕部は7自由度を有するとする。

#### 【0040】

また、体幹部ユニット202は、体幹ピッチ軸104と、体幹ロール軸105と、体幹ヨー軸106という3自由度を有する。

#### 【0041】

また、下肢を構成する各々の脚部ユニット205R/Lは、股関節ヨー軸115と、股関節ピッチ軸116と、股関節ロール軸117と、膝関節ピッチ軸118と、足首関節ピッチ軸119と、足首関節ロール軸120と、足底121とで構成される。本明細書中では、股関節ピッチ軸116と股関節ロール軸117の交点は、ロボット装置201の股関節位置を定義する。人体の足底121は、実際には多関節・多自由度の足底を含んだ構造体であるが、本明細書においては、簡単のためロボット装置201の足底は、ゼロ自由度とする。したがって、各脚部は、6自由度で構成される。

#### 【0042】

以上を総括すれば、ロボット装置201全体としては、合計で $3 + 7 \times 2 + 3 + 6 \times 2 = 32$ 自由度を有することになる。ただし、エンターテインメント向けのロボット装置201が必ずしも32自由度に限定されるわけではない。設計・制作上の制約条件や要求仕様等に応じて、自由度すなわち関節数を適宜増減することができるというまでもない。

#### 【0043】

上述したようなロボット装置201がもつ各自由度は、実際にはアクチュエータを用いて実装される。外観上で余分な膨らみを排してヒトの自然体形状に近似させること、2足歩行という不安定構造体に対して姿勢制御を行うこと等の要請から、アクチュエータは小型且つ軽量であることが好ましい。

#### 【0044】

このようなロボット装置は、ロボット装置全体の動作を制御する制御システムを例えば体幹部ユニット202等に備える。図3は、ロボット装置201の制御システム構成を示す模式図である。図3に示すように、制御システムは、ユーザ入力等に動的に反応して情緒判断や感情表現を司る思考制御モジュール200と、アクチュエータ350の駆動等、ロボット装置201の全身協調運動を制御する運動制御モジュール300とで構成される。

#### 【0045】

思考制御モジュール200は、情緒判断や感情表現に関する演算処理を実行するCPU (Central Processing Unit) 211や、RAM (Random Access Memory) 212、ROM (Read Only Memory) 213及び外部記憶装置（ハード・ディスク・ドライブ等）21

4等で構成され、モジュール内で自己完結した処理を行うことができる、独立駆動型の情報処理装置である。

#### 【0046】

この思考制御モジュール200は、画像入力装置251から入力される画像データや音声入力装置252から入力される音声データ等、外界からの刺激等に従って、ロボット装置201の現在の感情や意思を決定する。すなわち、上述したように、入力される画像データからユーザの表情を認識し、その情報をロボット装置201の感情や意思に反映させることで、ユーザの表情に応じた行動を発現することができる。ここで、画像入力装置251は、例えばCCD (Charge Coupled Device) カメラを複数備えており、これらのカメラにより撮像した画像から距離画像を得ることができる。また、音声入力装置252は、例えばマイクロホンを複数備えている。

#### 【0047】

思考制御モジュール200は、意思決定に基づいた動作又は行動シーケンス、すなわち四肢の運動を実行するように、運動制御モジュール300に対して指令を発行する。

#### 【0048】

一方の運動制御モジュール300は、ロボット装置201の全身協調運動を制御するCPU311や、RAM312、ROM313及び外部記憶装置（ハード・ディスク・ドライブ等）314等で構成され、モジュール内で自己完結した処理を行うことができる独立駆動型の情報処理装置である。また、外部記憶装置314には、例えば、オフラインで算出された歩行パターンや目標とするZMP軌道、その他の行動計画を蓄積することができる。

#### 【0049】

この運動制御モジュール300には、図2に示したロボット装置201の全身に分散するそれぞれの関節自由度を実現するアクチュエータ350、対象物との距離を測定する距離計測センサ（図示せず）、体幹部ユニット202の姿勢や傾斜を計測する姿勢センサ351、左右の足底の離床又は着床を検出する接地確認センサ352、353、足底121の足底121に設けられる荷重センサ、バッテリー等の電源を管理する電源制御装置354等の各種の装置が、バス・インターフェース（I/F）310経由で接続されている。ここで、姿勢センサ351は、例えば加速度センサとジャイロ・センサの組み合わせによって構成され、接地確認センサ352、353は、近接センサ又はマイクロ・スイッチ等で構成される。

#### 【0050】

思考制御モジュール200と運動制御モジュール300は、共通のプラットフォーム上で構築され、両者間はバス・インターフェース210、310を介して相互接続されている。

#### 【0051】

運動制御モジュール300では、思考制御モジュール200から指示された行動を体現すべく、各アクチュエータ350による全身協調運動を制御する。すなわち、CPU311は、思考制御モジュール200から指示された行動に応じた動作パターンを外部記憶装置314から取り出し、又は、内部的に動作パターンを生成する。そして、CPU311は、指定された動作パターンに従って、足部運動、ZMP軌道、体幹運動、上肢運動、腰部水平位置及び高さ等を設定するとともに、これらの設定内容に従った動作を指示する指令値を各アクチュエータ350に転送する。

#### 【0052】

また、CPU311は、姿勢センサ351の出力信号によりロボット装置201の体幹部ユニット202の姿勢や傾きを検出するとともに、各接地確認センサ352、353の出力信号により各脚部ユニット205R/Lが遊脚又は立脚のいずれの状態であるかを検出することによって、ロボット装置201の全身協調運動を適応的に制御することができる。更に、CPU311は、ZMP位置が常にZMP安定領域の中心に向かうように、ロボット装置201の姿勢や動作を制御する。

**【0053】**

また、運動制御モジュール300は、思考制御モジュール200において決定された意思通りの行動がどの程度発現されたか、すなわち処理の状況を、思考制御モジュール200に返すようになっている。このようにしてロボット装置201は、制御プログラムに基づいて自己及び周囲の状況を判断し、自律的に行動することができる。

**【0054】**

このようなロボット装置においては、頭部ユニット203にステレオビジョンシステムを搭載し、外界の3次元距離情報を取得することができる。次に、このようなロボット装置などに好適に搭載されるものであって、ステレオビジョンによる3次元距離情報を利用した本実施の形態における平面検出装置について説明する。なお、距離情報としては、レーザレンジファインダ（レーザ距離計測計）などによる距離情報を使用してもよいことは勿論である。

**【0055】**

本実施の形態における平面検出装置は、線分拡張法により、視野内において支配的な平面だけでなく、例えば階段など複数の平面が存在する場合であっても確実に複数平面を検出することができ、平面を検出する際に抽出する線分抽出において、距離データの点の分布に応じて適応的に線分をフィッティングさせることにより計測ノイズに対してロバストな平面検出結果を得ることができるものである。

**【0056】**

図4は、本実施の形態における平面検出装置を示す機能ブロック図である。図4に示すように、平面検出装置1は、3次元の距離データを取得する距離データ計測手段としてのステレオビジョンシステム（Stereo Vision System）2と、3次元の距離データからなる距離画像に存在する平面を線分拡張法により検出する平面検出部3とを有する。平面検出部3は、画像を構成する距離データ点から同一平面にあると推定される距離データ点群を選択し、この距離データ点群毎に線分を抽出する線分抽出部4と、画像内に含まれる、線分抽出部4によって抽出された全線分からなる線分群から、該画像内に存在する1又は複数の平面領域を検出する領域拡張部5とを有する。領域拡張部5は、線分群から同一平面上に存在すると推定される任意の3本の線分を選択し、これらから基準平面を求める。そして、選択した3本の線分に隣接する線分がこの基準平面と同一平面に属するか否かを判定し、同一平面に属すると判定した場合にはその領域拡張用線分としての線分により基準平面を更新すると共に基準平面の領域を拡張する。

**【0057】**

ステレオビジョンシステム2は、例えばロボット装置201の画像入力部251により取得された画像から距離画像を生成するものであり、外界を観測した結果、両眼の視差によって推定される3次元距離データD1を線分抽出部4に出力する。

**【0058】**

線分抽出部4は、その距離画像における列または行毎の各データ列において、3次元空間内で同一平面上にあると推定される距離データ点群を抽出し、この距離データ点群から距離データ点群の分布に応じて1以上の線分を生成する。すなわち、分布に偏りがあると判断された場合には、データ点群は同一平面上にないと判断し、データ点群を分割し、分割したデータ点群それぞれについて再度分布に偏りがあるかを判断する処理を繰り返し、分布に偏りがない場合にはそのデータ点群から線分を生成する。全てのデータ列について以上の処理を行い、生成した線分群D2を領域拡張部5に出力する。

**【0059】**

領域拡張部5は、この線分群D2において、同一の平面に属すると推定される線分を3本選択し、これらから基準平面としての種となる平面を求める。この種となる平面の領域（領域種：seed region）に対して、該領域種と同一平面に属する線分を順次統合していくことで拡張していく領域拡張によって距離画像を複数の平面に分割し、平面群D3を出力する。

**【0060】**

ロボット装置 201 は、障害物回避や階段昇降など平面の情報が必要なとき、または定期的にこれらの処理を行うことによって、階段や床面、壁といった歩行に重要な平面の情報を取得する。

#### 【0061】

次に、平面検出装置 1 を構成するステレオビジョンシステム 2 について更に詳細に説明する。ステレオビジョンシステム 2 は、人間の両眼に相当する左右 2 つのカメラからの画像入力を各画素近傍毎に比較し、その視差から対象までの距離を推定し、3 次元距離情報を画像として出力（距離画像）する。

#### 【0062】

図 5 は、ロボット装置 201 が外界を撮影している様子を示す模式図である。床面を  $x-y$  平面とし、高さ方向を  $z$  方向としたとき、図 5 に示すように、画像入力部（ステレオカメラ）を頭部ユニット 203 に有するロボット装置 201 の視野範囲は、ロボット装置 201 の前方の所定範囲となる。

#### 【0063】

ロボット装置 201 は、上述した CPU 211 において、画像入力装置 251 からのカラー画像及び視差画像と、各アクチュエータ 350 の全ての関節角度等のセンサデータなどが入力されてソフトウェア構成を実現する。

#### 【0064】

本実施の形態のロボット装置 201 におけるソフトウェアは、オブジェクト単位で構成され、ロボット装置の位置、移動量、周囲の障害物、及び環境地図等を認識し、ロボット装置が最終的に取るべき行動についての行動列を出力する各種認識処理等を行うことができる。なお、ロボット装置の位置を示す座標として、例えば、ランドマーク等の特定の物体等に基づく所定位置を座標の原点としたワールド基準系のカメラ座標系（以下、絶対座標ともいう。）と、ロボット装置自身を中心（座標の原点）としたロボット中心座標系（以下、相対座標ともいう。）との 2 つの座標を使用する。

#### 【0065】

ステレオビジョンシステム 2 では、カラー画像及びステレオカメラによる視差画像などの画像データが撮像された時間において、センサデータから割り出した関節角を使用してロボット装置 201 が中心に固定されたロボット中心座標系を頭部ユニット 203 に設けられた画像入力装置 251 の座標系へ変換する。この場合、本実施の形態においては、ロボット中心座標系からカメラ座標系の同次変換行列等を導出し、この同次変換行列とこれに対応する 3 次元距離データからなる距離画像を平面検出部 3 へ出力する。

#### 【0066】

ここで、本実施の形態における平面検出装置は、上述したハフ変換のように、取得した画像に含まれる支配的な平面を検出するのみならず、階段など複数平面が含まれている場合であっても平面を検出可能とするため、線分拡張法により平面を検出する。そして、この際、距離データ点の分布に応じて線分を生成することにより、計測ノイズに対してロバストな検出結果を得ることができるものである。以下では、本実施の形態における平面検出装置を搭載したロボット装置が視野内に含まれる階段 ST を検出する場合を例にとって説明する。

#### 【0067】

階段としては、例えば図 6、図 7 に示すようなものがある。図 6 (a)、図 7 (a) は、階段を正面から見た図、図 6 (b)、図 7 (b) は、階段を側面から見た図、図 6 (c)、図 7 (c) は、階段を斜めから見た図である。

#### 【0068】

ここで、本明細書においては、人間、ロボット装置などが階段を昇降するために使用する面（足又は可動脚部を載せる面）を踏面といい、一の踏面からその次の踏面までの高さ（1 段の階段の高さ）を蹴り上げということとする。また、階段は、地面に近い方から 1 段目、2 段目とカウントすることとする。

#### 【0069】



図6に示す階段ST1は、段数が3段の階段であり、蹴り上げ4cm、1, 2段面の踏面の大きさは幅30cm、奥行き10cm、最上段である3段目の踏面のみ、幅30cm、奥行き21cmとなっている。また、図7に示す階段ST2も段数が3段の階段であり、蹴り上げ3cm、1, 2段面の踏面の大きさは幅33cm、奥行き12cm、最上段である3段目の踏面のみ、幅33cm、奥行き32cmとなっている。

#### 【0070】

図8乃至図10は、図7に示す階段ST2を(a)は図7に示す階段をステレオビジョンシステムによってそれぞれ前方、側方、斜め前方から撮影した場合の画像を示す模式図、(b)乃至(c)は(a)に示す画像から取得した3次元の距離データを示す図である。

#### 【0071】

図8(a)に示すように、正面から階段ST2を撮影した場合、3次元の距離データは、図8(b)乃至図8(c)のようになる。図8(b)において、横軸をy方向、縦軸をx方向とし、z軸方向(高さ方向)の大きさは、ロボット装置201の接地面を0とし、高さが高くなるほど白に近づくような濃淡値で示している。すなわち、濃淡(濃淡値)が同様のデータ点は同一高さにあることを示し、図8(b)に示すように、階段ST2においても1段目より2段目、2段目より3段目の踏面にあたる領域のデータ点の濃淡が薄くなっている。また、距離データが図示されている略台形領域がロボット装置が撮影可能な範囲(視野範囲)を示す。また、同図において、距離データ点は略4段階の濃淡に分かれているが、z方向が最も小さい領域に対応する最も濃淡が濃い箇所は、床面を示している。また、図8(c)は、横軸をy方向、縦軸をz方向、x方向を色の濃淡で示すものである。この図では、x方向の距離が大きくなるほど濃淡が薄くなるように表現されている。図8(d)は、横軸をx方向、縦軸をz方向とし、y方向をその距離に応じて濃淡で表現している。

#### 【0072】

また、ロボット装置201が階段ST2の側面を撮影した場合は、図9に示すように、x軸が大きい上方側の領域に存在するデータ点が、高さが0と同様の濃淡を示しており、階段ST2の奥の床面を計測した結果であることを示している。また、図10に示す斜め方向からの撮像においても、床面及び1~3段目の踏面を示す4つの領域が、高さの違いに応じて異なる濃淡で示され、はっきり区別できていることを示している。

#### 【0073】

ここで、このような3次元距離データをステレオカメラによって取得するためには、階段ST2の表面に模様(テクスチャ)が必要となる。すなわち、2台のカメラによる視差により得ることができるため、模様がなければ視差が算出できず、正確に距離を計測することができない。すなわち、ステレオビジョンシステムにおける距離データの計測精度は、計測対象のテクスチャに依存することになる。なお、視差とは、空間中のある点が左目及び右目に写像される点の違いを示し、そのカメラからの距離に応じて変化するものである。

#### 【0074】

そこで、図11に示すように、ロボット装置の頭部ユニットに、ステレオビジョンシステムを構成するステレオカメラ11R/Lを備えると共に、例えば同じく頭部ユニットなどに投射手段としての例えば赤外光などを出力する光源12を設ける。この光源12は、模様がないう階段ST3、その他テクスチャがないか少ない物体、壁などの対象物に対してこれを投射(照射)し、ランダムなパターンPTを付与する模様付与手段として作用する。なお、ランダムパターンPTを形成して距離画像を取得できるものであれば、ランダムパターンPTを付与する手段は赤外光を投射する光源などには限らず、例えばロボット装置自ら対象物に模様を書いたりしてもよいが、赤外光であれば、人間の目にはみえないものの、ロボット装置に搭載されるCCDカメラなどにおいては観測可能なパターンを付与することができる。

#### 【0075】

次に、平面検出装置 1 の平面検出部 3 について説明する。この平面検出部 3 は、線分拡張法を使用して平面を検出するものであり、図 12 は、線分拡張法による平面検出方法を説明する図である。線分拡張法による平面検出では、図 12 に示すように、まず、焦点 F から撮影された画像 11 において、行方向または列方向のデータ列における処理をする。画像内の例えば行方向の画素列 (image row: イメージロウ) において、距離データ点が同一の平面に属するならば直線となることを利用し、同一平面に属すると推定される距離データ点からなる線分を生成する。そして、得られた複数の線分からなる線分群において、同一平面を構成するとされる線分群に基づき平面を推定、検出する方法である。

#### 【0076】

図 13 は、線分拡張法による平面検出処理を示すフローチャートである。図 13 に示すように、先ず、距離画像を入力し (ステップ S1)、距離画像の行方向 (又は列方向) の各画素列において同一平面に属すると推定されるデータ点から線分を求める (ステップ S2)。そして、これらの線分群の中から同一平面に属すると推定される線分を抽出し、これらの線分からなる平面を求める (ステップ S3)。このステップ S3 では、まず、平面の種となる領域 (以下、領域種 (seed region) という。) を選び、該当する領域種を選択する。この選択においては、上下隣接する行方向 (又は左右隣接する列方向) の 1 ラインを含む 3 本の線分が同一平面にあることを条件とする。ここで、選択した 3 本の線分からなる領域種が属する平面を基準平面とし、3 本の線分から平均して求まる平面を求めておく。また、3 本の線分からなる領域を基準平面領域とする。

#### 【0077】

そして、選択した領域種に隣接する行方向 (又は列方向) の画素列からなる直線と上記基準平面とが同じ平面であるかどうかを空間的な距離を比較することで判断し、同じ平面である場合には、その隣接する線分を基準平面領域に追加し (領域拡張処理)、追加した線分を含めたものとして上記基準平面を更新し (平面更新処理)、これを平面領域に隣接するデータ列に同一平面の線分が存在しなくなるまで繰り返し行う。そして、以上領域種を検索して平面更新及び領域拡張処理を、種となる領域 (3 本の線分) が存在しなくなるまで繰り返し実行する。最後に、得られた複数の領域群の中から同一平面を構成するものを連結する。そして、本実施の形態においては、得られた平面に属する線分群のうち、平面から所定の閾値以上外れる線分を除いて再度平面を求める平面再算出処理をステップ S4 として更に設け、最終的な平面とするが、詳細は後述する。

#### 【0078】

ここで、3 次元距離データから線分を検出し、これを同一平面毎にまとめた領域を 1 つの平面とする処理は従来の線分拡張法による平面検出処理であるが、本実施の形態においては、ステップ S2 における線分抽出方法が従来とは異なる。すなわち、上述したように、距離データ点から線分を求めて距離データ点にできるだけフィットするように線分を生成しようとしても、距離データの精度に応じて閾値を変更しなければ、over-segmentation 又は under-segmentation などものの問題が生じてしまう。そこで、本実施の形態においては、この線分抽出において、距離データの分布を解析することで、距離データの精度、ノイズに応じて適応的に閾値を変更する手法を導入するものとする。

#### 【0079】

以下、図 13 に示す線分拡張法による平面検出方法について更に詳細に説明する。線分抽出器 (Line Extraction) 4 は、上述したように、ステレオビジョンシステム 2 からの 3 次元距離画像を入力とし、距離画像の各列または各行毎に 3 次元空間内で同一平面上にあると推定される線分を検出する。この線分抽出において、計測ノイズなどによる、上述した over-segmentation や under-segmentation の問題、すなわち、本来は複数の平面であるのに 1 つの平面として認識してしまったり、本来は 1 つの平面であるのに、複数の平面として認識してしまったりする問題を回避するため、データ点の分布に応じて適応的に線分フィッティングさせるアルゴリズム (Adaptive Line Fitting) を導入する。Adaptive Line Fitting は、線分抽出部 4 において、先ず比較的大きい閾値を使用して大まかに第 1 の線分としての線分を抽出し、次に抽出された第 1 の線分に属するデータ点群から後述する

最小二乗法によって得られる第2の線分としての線分に対する該データ点群の分布を解析する。すなわち、同一平面上に存在するか否かを大まかに推定してデータ点群を抽出し、抽出したデータ点群におけるデータ点の分布の偏りがあるか否かを解析して同一平面上に存在しているか否かを再度推定する。

#### 【0080】

本実施の形態においては、このデータ点の分布を解析し、データ点群が後述するジグザグ形 (zig-zag-shape) に当てはまる場合には、分布に偏りがあるとしてデータ点群を分割する処理を行い、これを繰り返すことによって、データ点群に含まれるノイズに対して適応的に線分の抽出を行うアルゴリズムを使用するものとする。

#### 【0081】

図14は、線分抽出部4における処理、すなわち、図13におけるステップS2の処理の詳細を示すフローチャートである。まず、線分抽出部4には、距離データが入力される。入力された距離データのうち、例えば行方向の画素列 (データ点列) において、3次元空間上で同一平面上に存在すると推定されるデータ点群を抽出する。3次元空間上で同一平面上に存在すると推定されるデータ点群は、例えば隣接するデータ点の距離が、例えば6cm以下など、データ点間の3次元空間における距離が所定の閾値以下のものからなるデータ点の集合などとしてことができ、これをデータ点群 ( $P[0 \cdots n-1]$ ) として抽出する (ステップS11)。そして、このデータ点群  $P[0 \cdots n-1]$  に含まれるサンプル数  $n$  が処理に最低限必要なサンプル数 (必要最小値)  $\min\_n$  より多いか否かをチェックし (ステップS12)、データ数  $n$  が必要最小値  $\min\_n$  より少ない場合 (S2: YES) には、検出結果として空集合を出力して処理を終了する。

#### 【0082】

一方、サンプル数  $n$  が必要最小値  $\min\_n$  以上である場合 (S2: NO)、データ点群  $P[0 \cdots n-1]$  の一方の端点  $P[0]$  と他方の端点  $P[n-1]$  とを結ぶ線分 (弦)  $L1$  を第1の線分として生成する。そして、データ点群  $P[0 \cdots n-1]$  から、この線分  $L1$  との距離が最も大きいデータ点を着目点  $\text{brk}$  として検索し、その距離  $\text{dist}$  を算出する (ステップS13)。最大距離  $\text{dist}$  がデータ点群分割の閾値  $\max\_d$  より大きい場合には (S14: YES)、データ点群  $P[0 \cdots n-1]$  を着目点 (分割点)  $\text{brk}$  にて2つのデータ点群  $p[0 \cdots \text{brk}]$  及び  $P[\text{brk} \cdots n-1]$  に分割する (ステップS18)。

#### 【0083】

一方、最大距離  $\text{dist}$  がデータ点群分割の閾値  $\max\_d$  より小さい場合には (S14: NO)、データ点群  $P[0 \cdots n-1]$  から後述する最小二乗法によって最適な線分の方程式  $\text{line}$  を求め (ステップS15)、この方程式  $\text{line}$  が示す線分  $L2$  を第2の線分として生成する。そして、データ点群  $P[0 \cdots n-1]$  がこの線分  $L2$  に対して後述する Zig-Zag-Shape であるかどうかを調べる (ステップS16)、Zig-Zag-Shape でない場合 (S16: NO)、得られた線分の方程式  $\text{line}$  を線分抽出結果リストに追加し (ステップS17)、処理を終了する。

#### 【0084】

また、ステップS16においてステップS15で求めた線分が Zig-Zag-Shape である判断された場合 (S16: YES)、上述のステップS14と同様、ステップS18に進み、ステップS13において距離  $\text{dist}$  を求めた着目点  $\text{brk}$  にてデータ点群を2つのデータ点群  $P[0 \cdots \text{brk}]$  及び  $P[\text{brk} \cdots n-1]$  に分割する。このステップS18にて2つのデータ点群が得られた場合には、それぞれを再帰的に再度ステップS11からの処理を行う。そして、この処理を分割された全てのデータ点について分割されなくなるまで、すなわち全てのデータ点群がステップS17を経るまで処理を繰り返し、これにより、全ての線分が登録された線分抽出結果リストを得る。このような処理によって、データ点群  $P[0 \cdots n-1]$  からノイズの影響を排除し複数の線分からなる線分群を精度よく検出することができる。

#### 【0085】

なお、ステップS13にてデータ点群  $P[0 \cdots n-1]$  の端点を結ぶ線分  $L1$  を生成す

るものとして説明したが、例えばデータ点群  $P [0 \cdots n-1]$  の分布、性質など必要に応じてデータ点群  $P [0 \cdots n-1]$  から最小二乗により線分  $L_1$  を求めてもよい。また、本実施の形態においては、着目点  $brk$  は、端点を結んだ線分  $L_1$  との距離が最大の点 1 つとしているが、例えば、上記のように最小二乗により求めた線分との距離が最大の点として、距離がデータ点群分割の閾値  $max\_d$  以上のものが複数ある場合はそれら全ての点又は選択した 1 つ以上にてデータ点群  $P [0 \cdots n-1]$  を分割するようにしてもよい。

#### 【0086】

次に、ステップ S15 における最小二乗による線分生成方法 (Least-Squares Line Fitting) について説明する。ある  $n$  個のデータ点群  $P [0 \cdots n-1]$  が与えられたとき、データ点群に最もフィットした直線の方程式を求める方法を示す。直線の方程式のモデルを下記式 (1) で表す。

#### 【0087】

##### 【数1】

$$x \cos \alpha + y \sin \alpha + d = 0 \quad \cdots (1)$$

#### 【0088】

この場合、 $n$  個のデータ点群  $P [0 \cdots n-1]$  の 1 点  $(x_i, y_i)$  において、直線方程式のモデルとデータ点との誤差の総和は下記式 (2) で表すことができる。

#### 【0089】

##### 【数2】

$$E_{fit} = \sum_i (x_i \cos \alpha + y_i \sin \alpha + d)^2 \quad \cdots (2)$$

#### 【0090】

データ点群に最もフィットした直線は、上記式 (2) の誤差の総和を最小化することによって求められる。上記式 (2) を最小にする  $\alpha$  及び  $d$  は、データ点群  $P$  の平均及び分散共分散行列を用いて下記 (3) のように求めることができる。

#### 【0091】

##### 【数3】

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{-2S_{xy}}{S_{y^2} - S_{x^2}}, \quad d = -(\bar{x} \cos \alpha + \bar{y} \sin \alpha) \quad \cdots (3)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{n} \sum_i x_i & \bar{y} &= \frac{1}{n} \sum_i y_i \\ S_{x^2} &= \sum_i (x_i - \bar{x})^2 & S_{y^2} &= \sum_i (y_i - \bar{y})^2 \\ S_{xy} &= \sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \end{aligned}$$

#### 【0092】

次に、ステップ S16 におけるジグザグ形 (Zig-Zag-Shape) 判別方法について説明する。この Zig-Zag-Shape 判別では、ある  $n$  個のデータ点群  $P [0 \cdots n-1]$  と直線  $Line (\alpha, d)$ 、 $x \cos \alpha + y \cos \alpha + d = 0$  が与えられたとき、そのデータ点群  $P [0 \cdots n-1]$  が、図 15 (a) に示すように直線  $Line$  に対して交差するか、図 15 (b) に示すように、例えばノイズなどの影響によりデータ点が一様に分布しているかを判別するものである。基本的には、直線  $Line$  の一方にデータ点群  $P [0 \cdots n-1]$  が連続して現

れる数をカウントし、ある一定数を超えて連続して現れる場合には、zig-zag-shapeであると判断することができる。図15(a)の場合には、データ点群P[0...n-1]によりよくフィットする直線Lineを求めるためにデータ点群P[i]を分割する必要がある。図16は、Zig-Zag-Shape判別方法を示すフローチャートである。

#### 【0093】

まず、データ点群P[0...n-1]と直線Line( $\alpha, d, \sigma$ )とを入力する(ステップS20)。ここで、 $\sigma$ は、点列の標準偏差を示す。次に、この標準偏差 $\sigma$ が所定の閾値 $th_{\sigma}$ より大きいかなんかを判断する。この標準偏差 $\sigma$ が閾値 $th_{\sigma}$ より小さい場合(ステップS21: No)は、演算器の浮動小数点演算誤差による誤差検出の影響を回避するため、判別を終了する。そして、標準偏差 $\sigma$ が閾値 $th_{\sigma}$ より大きい場合のみ判別処理を継続する。次に、データ点群P[0...n-1]のうちの最初のデータ点P[0]が直線のどちら側にあるかを $\text{sing}(\text{sdist}(P[0]))$ によって判断し、この結果を $val_0$ に代入すると共に $val_0$ と同じ側にあるデータ点の連続数をカウントするカウンタ(以下、連続点カウンタといい、このカウンタ値をカウンタ値countという。)のカウンタ値countを1に設定する(ステップS22)。ここで、 $\text{sign}(x)$ は、xの値の符号(+又は-)を返す関数であり、 $\text{sdist}(i)$ は、 $P[i].x \cos \alpha + P[i].y \cos \alpha + d$ として計算された直線Lineにおいて、i番目のデータ点との正負の距離を示す。すなわち、 $Val_0$ には、データ点P[0]が直線Lineのどちら側にあるかで+又は-の符号が代入される。

#### 【0094】

次に、データ点をカウントするためのカウンタ(以下、データ点カウンタといい、このカウンタ値をカウンタ値iという。)のカウンタ値iを1とする(ステップS23)。そして、データ点カウンタのカウンタ値iがデータ数nより小さい場合(ステップS24: YES)、その次のデータ(以下、i番目とする。)のデータ点であるデータ点P[i]が直線のどちら側にあるかを $\text{sing}(\text{sdist}(P[i]))$ によって判断し、この結果を $val$ に代入する(ステップS25)。そして、ステップS22にて求めた $val_0$ とステップS25にて求めた $val$ とを比較し、 $val_0$ と $val$ とが異なる場合(ステップS26: NO)、 $val_0$ に $val$ を代入し、連続点カウンタのカウンタ値countに1を代入し(ステップS28)、データ点カウンタのカウンタ値iをインクリメントして(ステップS30)ステップS24からの処理に戻る。

#### 【0095】

一方、ステップS26において、 $val_0$ と $val$ とが同じ場合(ステップS26: YES)、データ点P[i-1]とP[i]は、直線Lineに対して同じ側にあると判断され、連続点カウンタのカウンタ値countを1つインクリメントする(ステップS27)。さらに、連続点カウンタのカウンタ値countがZig-Zag-Shapeと判定されるための最小のデータ点数 $\text{min}_c$ より大きいかなんかを判定し(ステップS29)、大きい場合には(ステップS29: YES)、Zig-Zag-Shapeと判断し、TRUEを出力して処理を終了する。一方、連続点カウンタのカウンタ値countが最小のデータ点数 $\text{min}_c$ より小さい場合には(ステップS29: NO)、ステップS30に進み、データ点カウンタのカウンタ値iをインクリメントして(ステップS30)、ステップS24からの処理を繰り返す。

#### 【0096】

そして、このステップS24からの処理を、データ点カウンタのカウンタ値iがデータ点数nに到達するまで続け、カウンタ値 $i \geq n$ となったところで、FALSEを出力して処理を終了する。

#### 【0097】

このようなジグザク形判別処理によって、n個のデータ点群P[0...n-1]と直線Line( $\alpha, d$ ):  $x \cos \alpha + y \cos \alpha + d = 0$ が与えられたとき、このデータ点群が直線Lineに対してzig-zagに交差しているかどうかを判断することができる。これによって、上述したように、ステップS16にてデータ点群を分割すべきかどうかを判断することができ、最小二乗により求めた直線に対し、データ点群がzig-zagに交差していると判断した場合にはデータ点群を分割すべきと判断してステップS18の処理へ進み、着目点

brkを分割点としてデータ点群を分割することができる。なお、上記ステップS21～ステップS30までの処理は図17のように表現することも可能である。

#### 【0098】

また、このようなZig-Zag-Shape判別処理は、演算器のみならずハードウェアで行うことも可能である。図18は、Zig-Zag-Shape判別処理を行う処理部を示すブロック図である。図18に示すように、Zig-Zag-Shape判別処理部20は、 $n$ 個のデータ点群 $P[0 \cdots n-1]$ が入力され、順次各データ点 $P[i]$ が直線Lineのいずれ側に位置するかを判別し、その判別結果Valを出力する方向判別部21と、1つ後のデータと方向判別部21の結果を比較させるための遅延部22と、データ点 $P[i]$ における方向判別結果Valとデータ点 $P[i-1]$ における方向判別結果Val<sub>0</sub>とを比較する比較部23と、比較部23において $Val=Val_0$ の場合に、カウント値をインクリメントする連続点カウンタ24と、連続点カウンタ24のカウント値countと最小データ点数格納部26から読み出した最小データ点数min\_cとを比較する比較部25とを有する。

#### 【0099】

このZig-Zag-Shape判別処理部における動作は以下ようになる。すなわち、方向判別部21は、データ点群 $P[0 \cdots n-1]$ から最小二乗法により直線Lineを求め、各データ点 $P[i]$ と直線Lineとの正負の距離を求め、その正負の符号を出力する。遅延部22は、データ点 $P[i-1]$ の直線Lineまでの距離に対する正負の符号が入力されると1つ後のデータ点 $P[i]$ の正負の符号が入力されるタイミングまでデータを格納する。

#### 【0100】

比較部23は、データ点 $P[i]$ とデータ点 $P[i-1]$ の上記正負の符号を比較し、同じ符号である場合にはカウンタ24のカウント値countをインクリメントする信号を出力し、正負の符号が異なればカウント値countに1を代入する信号を出力する。比較部25は、カウント値countと最小データ点数min\_cとを比較し、最小データ点数min\_cよりカウント値countが大きい場合には、データ点群 $P[0 \cdots n-1]$ がジグザグであることを示す信号を出力する。

#### 【0101】

次に、図4に示す領域拡張部(Region Growing)5について説明する。領域拡張部5は、線分抽出部4によって得られた線分群を入力とし、それらの線分それぞれがどの平面に属しているかを点列の平面への当てはめ(Plane Fitting)により判断し、与えられる線分群からなる領域を複数の平面(平面領域)に分離する。複数の平面に分離するために、以下の手法をとる。

#### 【0102】

まず、与えられた線分群から、同じ平面上にあると推定される隣接する3本の線分を検索する。この3本の線分により求められる平面(基準平面)が、平面の種となるものであり、この3本の線分が含まれる領域を領域種(seed region)という。そして、この領域種に隣接する線分を順次、基準平面と同一平面上にある線分か否かを点列の平面への当てはめ(Plane Fitting)により判断し、隣接する線分が同じ平面に含まれると判断された場合には、この線分を領域拡大用の線分として領域種に追加してその領域を拡大すると共に、基準平面の方程式を上記領域拡大用の線分を含めて再度算出し直す。このような処理によって、全ての線分を何れかの領域(平面)に配分する。

#### 【0103】

図19は、領域拡張処理を説明するための模式図である。図19に示すように、画像30内に複数の平面からなる階段31が存在する場合、例えば太線で示す32a～32cの3本の線分が領域種として選択されたとする。これら3本の線分32a～32cからなる領域が領域種となる。まず、この3本の線分32a～32cにより1つの平面(基準平面)Pを求める。次に、領域種の最も外側の線分32a又は32cに領域種外にて隣接するそれぞれデータ列33又は34において、平面Pと同一の平面である線分を選択する。ここでは、線分33aが選択されるとする。次に、これら4本の線分群からなる平面P'を求め、基準平面Pを更新する。次に、線分34aが選択されれば、5本の線分群からなる

平面  $P'$  を求め、平面  $P$  を更新する。これを繰り返すことにより、階段 31 の 2 段目の踏面が、破線で囲まれる平面 45 として求められる。このようにして、選択された領域種を種として追加する線分がなくなるまで領域拡大処理する。そして、追加する線分がなくなった場合、再び画像 30 内から領域種となる 3 つの線分を検索して領域拡大処理を実行するというような処理を繰り返し、領域種となる 3 つの線分がなくなるまで図 13 のステップ S3 の処理を繰り返す。

【0104】

次に、データ点群  $P [0 \cdots n-1]$  から構成される平面の方程式を推定する手法 (Plane Fitting)、これを使用して領域種を選択する方法 (Selection of seed region)、領域種から領域を拡大していく領域拡張処理 (Region growing)、及び得られた平面方程式から誤差が大きいものなどを除いて再度算出する後処理 (Post processing) について説明する。

【0105】

3次元空間内の点  $P$  は  $P = (x_i, y_i, z_i)$  により表わされ、平面の方程式はその法線ベクトル  $n (n_x, n_y, n_z)$  と非負の定数  $d$  によって下記式 (4) で表される。

【0106】

【数 4】

$$xn_x + yn_y + zn_z + d = 0 \quad \cdots(4)$$

【0107】

ここで、図 5 に示すように、ステレオカメラでは、焦点を通る平面を観測することができない、すなわち、平面は焦点を通らないため、 $d \neq 0$  とすることができる。したがって、平面は、最小二乗法により下記式 (5) に示す値を最小にする値として求めることができる。

【0108】

【数 5】

$$fit(n, d) = \sum_i (p_i^T n + d)^2 \quad \cdots(5)$$

【0109】

最適解は  $n = m / \|m\|$ ,  $d = -1 / \|m\|$  として求まる。ここで、 $\|\cdot\|$  は、ベクトルの大きさ、 $m$  は、行列式によって連立一次方程式を解くクラメールの法則 (Cramer's rule) を使用して下記 (6-1) のように容易に得られる線形システムの解である。

【0110】

【数 6】

$$A \cdot m = b \quad \cdots(6-1)$$

ここで、

$$A = \sum_i p_i p_i^T, \quad b = \sum_i p_i \quad \cdots(6-2)$$

【0111】

この解は、新たなデータ点が加えられたり、又はデータ点削除されたりした場合であっても、上記式 (6-2) に示す  $A$  と  $b$  の値を更新するのみで、平面パラメータを再計算することができる。更に、本実施の形態における線分抽出方法の場合は  $n$  個のデータ点群の 2 つのモーメント (1 次モーメント: 平均、2 次モーメント: 分散)  $E(p)$ 、 $E(pp^T)$  が既知であり、これらを使用して、下記 (7) に示すように  $A$ 、 $b$  を更新することが

でき、 $n$  個のデータ点群における平面更新処理に拡張することができる。

【0112】

【数7】

$$\mathbf{A} \leftarrow \mathbf{A} + nE(\mathbf{p}\mathbf{p}^T), \quad \mathbf{b} \leftarrow \mathbf{b} + nE(\mathbf{p}) \quad \dots(7)$$

【0113】

また、一度平面パラメータ  $n, d$  を算出すれば、求まった平面方程式から、 $n$  個のデータ点群の平面方程式からの外れ度合いを示す平面方程式の2乗平均誤差 (RMS (root mean square) residual) (以下、 $rms$  という。) を下記式 (8) により算出することができる。この場合も、 $n$  個のデータ点の上記2つのモーメントを使用して下記式 (8) を求めることができる。

【0114】

【数8】

$$rms(\mathbf{p}_1 \dots \mathbf{p}_n) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i (\mathbf{p}_i^T \mathbf{n} + d)^2} > th\_rms \quad \dots(8)$$

【0115】

上記 (8) に示すように、各データ点が求めた平面上にあれば平面方程式の2乗平均誤差  $rms(\mathbf{p}_1 \dots \mathbf{p}_n)$  は0になる値であり、この値が小さいほど各データ点が平面によくフィットしていることを示す。

【0116】

次に、領域種 (seed region) を検索する方法及び領域種から領域を拡大すると共に平面を更新する方法について説明する。図20は、領域種を検索する処理及び領域拡張処理の手順を示すフローチャートである。図20に示すように、領域種の選択には、先ず、線分抽出の際に使用した行方向又は列方向のデータ列が隣接する3つの線分 ( $l_1, l_2, l_3$ ) であって、互いの線分 ( $l_1, l_2$ ), ( $l_2, l_3$ ) における画素位置が上記データ列とは直交する方向にて重複したものを検索する (ステップS31)。各データ点は画像内における画素位置を示すインデックス (index) を有しており、例えば行方向のデータ列における線分である場合、このインデックスを比較して列方向にて重複しているか否かを比較する。この検索に成功した場合 (ステップS32: YES)、上記式 (7) を使用して上記 (6-1) を算出する。これにより、平面パラメータ  $n, d$  を決定でき、これを使用して上記式 (8) に示す平面方程式の2乗平均誤差 ( $l_1, l_2, l_3$ ) を計算する (ステップS33)。そして、この平面方程式の2乗平均誤差  $rms(l_1, l_2, l_3)$  が例えば1cmなどの所定の閾値  $th\_rms_1$  より小さい場合には、この3つの線分を領域種として選択する (ステップS34)。所定の閾値  $th\_rms_1$  より大きい場合には、再びステップS31に戻り、上記条件を満たす線分を検索する。また、領域種に選ばれた線分は、線分群のリストから除くことで、他の平面拡張などの際に使用されないようにしておく。

【0117】

こうして選択された領域種から線分拡張法により領域を拡張する。すなわち、先ず、領域種の領域に追加する候補となる線分を検索する (ステップS35)。なお、この領域は、領域種が既に更新されている場合の、後述する更新された領域種も含む。候補となる線分は、領域種の領域に含まれる線分 (例えば  $l_1$ ) に隣接する線分 ( $l_4$ ) であって、上述同様、これらの線分の画素位置が相互に重なりあうことを条件とする。検索が成功した場合 (ステップS36: YES)、その平面方程式の2乗平均誤差  $rms(l_4)$  を算出し、これが所定の閾値  $th\_rms_2$  より小さいか否かを判定し (ステップS37)、小さい場合には平面パラメータを更新し (ステップS38)、再びステップS35からの処理



を繰り返す。ここで、候補となる線分がなくなるまで処理を繰り返し、候補となる線分がなくなったら（ステップ S36:NO）、ステップ S31 の処理に戻り、再び領域種を検索する。そして、線分群に含まれる領域種がなくなった場合（ステップ S32:NO）、今まで得られている平面パラメータを出力して処理を終了する。

#### 【0118】

ここで、本実施の形態においては、領域種を検索し、3つの線分が同一平面に属するか否かの判定、及び領域拡張処理を行う際に基準平面又はこれを更新した更新平面に属するか否かの判定には、上記式（8）を使用する。すなわち、平面方程式の2乗平均誤差  $rms$  が所定の閾値（ $th\_rms$ ）未満である場合にのみその線分（群）を同一平面に属するものと推定し、その線分を含めた平面として再び平面を算出する。このように平面方程式の2乗平均誤差  $rms$  を使用して同一平面に属するか否かを判定することにより、更にノイズにロバストでかつ、細かい段差を含んでいるような場合にも正確に平面を抽出することができる。以下にその理由について説明する。

#### 【0119】

図21は、その効果を示す図であって、端点と直線との距離が等しくても平面方程式の2乗平均誤差  $rms$  が異なる例を示す模式図である。ここで、非特許文献4のように、領域拡張処理する際、注目の直線（線分）の端点（end point）と平面Pとの距離Dの値が所定の閾値より小さい場合に、当該注目の線分が平面Pと同一平面であるとして領域拡張処理を行うと、平面Pに交差する直線La（図21（a））と、平面Pと平行で所定距離ずれているような直線Lb（図21（b））とが同様に平面Pの更新に使用されることとなる。ここで、平面方程式の2乗平均誤差  $rms$  を求めると、図21（a）の直線Laから求まる平面方程式の2乗平均誤差  $rms$ （La）に比して図21（b）の直線Lbから求まる平面方程式の2乗平均誤差  $rms$ （Lb）の方が大きい。すなわち、図21（a）のように、直線Laと平面Pとが交差する場合は、平面方程式の2乗平均誤差  $rms$  が比較的小さくノイズの影響である場合が多いのに対し、図21（b）のような場合、平面方程式の2乗平均誤差  $rms$  が大きく、直線Lbは平面Pと同一平面ではなく異なる平面P'である確率が高い。したがって、複数の平面が含まれるような環境から平面を精確に求める必要がある場合などにおいては、本実施の形態のように、平面方程式の2乗平均誤差  $rms$  を算出し、この値が所定の閾値未満である場合に同一平面と判断することが好ましい。なお、環境や距離データの性質に応じて、従来と同様、線分の端点と平面との距離が所定の閾値以下の場合は当該線分を平面に含めるようにしたり、これらを組み合わせてもよい。

#### 【0120】

また、面パラメータ  $n$ ,  $d$  を一旦算出すれば、平面方程式の2乗平均誤差  $rms$  は、データ点群について線分抽出の際に求めた2つのモーメントの値から平面方程式を更新し、上記式（8）にて簡単に算出することができる。

#### 【0121】

また、上述の領域種の選択方法は、図22のようにも表現することができる。overlap( $l_j, l_k$ )は、各イメージロウに含まれる直線ベクトル  $l_j$  と  $l_k$  における端点間の位置が直線ベクトルとは直交する位置にて重なっている場合にtrueを出力する関数である。また、fitPlane( $l_1, l_2, l_3$ )は、上記式（4）～（7）により  $A \cdot m = b$  の解を求め平面パラメータ  $n$ ,  $d$  を計算し、上記式（8）により算出された  $A$ ,  $b$  により、直線ベクトル  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  を平面にフィッティングさせる関数である。

#### 【0122】

$rms(l_1, l_2, l_3)$  は、上記式（6）を使用して3本の直線全てにおいて、平面方程式の2乗平均誤差  $rms$  の値を算出する関数である。また、remove( $l_1, l_2, l_3$ ) は、lines [ $i$ ], lines [ $i+1$ ], lines [ $i+2$ ] から領域種を構成するとして選択されたそれぞれ直線  $l_1, l_2, l_3$  を除くことを意味し、これにより、再びこれらの直線が計算に使用されることを防止する。

#### 【0123】

また、領域拡張処理は、図 23 のように表現することもできる。図 21 において、A 及び b は、上記式 (6-1) に示すそれぞれ行列及びベクトルである、また、 $\text{add}(A, b, l)$  は、上記式 (8) により、A と b に直線 line のモーメントを加える関数である。 $\text{Solve}(A, b)$  は、 $A \cdot m = b$  を満たす m を求め、上記式 (4) ~ (7) により平面パラメータ n, d を計算する。 $\text{select}(\text{open})$  は、例えば最初の 1 つなど、open の中から任意に 1 つのエレメントを選択する関数である。また、 $\text{index}(l_1)$  は、画素列又は行における  $l_1$  のインデックスを返す関数である。また、 $\text{neighbor}(\text{index})$  は、与えられたインデックスに隣接したインデックス、例えば  $\{\text{index}-1, \text{index}+1\}$  を返す関数である。

#### 【0124】

また、上述したように、本実施の形態においては、図 13 のステップ S3 において領域拡張処理を行って平面方程式を更新した後、ステップ S4 において平面方程式を再度算出する処理 (Post processing) を行う。この再度算出する処理では、例えば上述のように更新され最終的に得られた平面方程式が示す平面に属するとされた距離データ点又は線分の平面からのずれを計算し、所定の値以上平面から外れる距離データ点又は線分は除き、再度平面方程式を更新することで、ノイズの影響を更に低減することができる。

#### 【0125】

次に、このステップ S4 について詳細に説明する。ここでは、2 つのステップにより、平面方程式を再度算出する方法について説明する。先ず、ステップ S3 にて検出された各平面の境界の距離データ点 (pixels) において、現在属している平面よりも、隣接する平面までの距離が近いデータ点が検出された場合は、当該データ点を隣接する平面の方に含める処理をする。また、いずれの平面にも属していなく、且つ距離が例えば 1.5 cm など比較的大きい閾値以下である平面が存在するデータ点が検出できた場合は、当該データ点をその平面に含める処理をする。これらの処理は各平面領域の境界近傍のデータ点を検索することで実行することができる。以上の処理が終了したら、再度平面方程式を算出する。

#### 【0126】

次に、上述のようにして再度算出された平面の各領域の境界近傍において、各データ点と平面との距離が例えば 0.75 cm など比較的小さい閾値を超える場合は、それらのデータ点を捨てる処理を実行する。これにより、その平面領域は若干小さくなるものの更に精確な平面を求めることができる。距離データ点を削除後、再び平面を求め、この処理を繰り返す。このことにより、極めて精密に平面を求めることができる。

#### 【0127】

次に各処理によって得られる結果を示す。図 24 (a) は、ロボット装置が立った状態で床面を見下ろした際の床面を示す模式図、図 24 (b) は、縦軸を x、横軸を y、各データ点の濃淡で z 軸を表現して 3 次元距離データを示す図であり、更に、行方向の画素列から線分抽出処理にて同一平面に存在するとされるデータ点群から直線を検出したものを示す。図 24 (b) に示す直線群から領域拡張処理によりえられた平面領域を図 24 (c) に示す。このように、ロボット装置の視野内には、1 つの平面 (床面) のみが存在する、すなわち、床面が全て同じ平面として検出されていることがわかる。

#### 【0128】

次に、床面に段差を一段置いたときの結果を図 25 に示す。図 25 (a) に示すように、床面 F には、1 段の段差 ST3 が載置されている。図 25 (b) は、実験条件を示す図であり、着目点と直線 (線分) との距離が  $\text{max\_d}$  を超える場合は、データ点群を分割する。また、抽出の成否 (水平) ( $\text{correct extraction(horizontal)}$ ) は、行方向のデータ列毎に、合計 10 回の線分抽出を行う線分拡張法による平面検出を行って成功した回数を示し、抽出の成否 (垂直) ( $\text{correct extraction(vertical)}$ ) は、列方向のデータ列毎についての抽出の成否を示す。また、No. 1 ~ No. 5 は、上述した Zig-Zag-Shape 判別処理を取り入れていない従来の線分拡張法による平面検出処理の条件、No. 6 は、Zig-Zag-Shape 判別処理を行った本実施の形態における平面検出方法の条件を示す。

#### 【0129】

図 2 5 (c) 及び図 2 5 (d) は、線分拡張法により平面検出した結果を示す図であって、それぞれ本実施の形態における手法により平面検出した結果、従来の線分拡張法により平面検出した結果（比較例）を示す。図 2 5 (b) に示すように、従来の手法においては、線分抽出（Line Fitting）において推定のための閾値パラメータ  $\max\_d$  を大きくする（ $\max\_d = 25, 30$ ）と検出率が下がり、閾値  $\max\_d$  小さくする（ $\max\_d = 10, 15$ ）と検出率が向上する。これに対して、本発明のように、ジグザグ形検証処理を導入することにより、大きな閾値  $\max\_d = 30$  を設定しても、優れた検出結果を示すことがわかる。

#### 【0130】

すなわち、閾値  $\max\_d$  を大きくすると、ノイズの影響が少なくなるものの、線分抽出が難しくなり、閾値  $\max\_d$  を小さくすると、ノイズの影響を受けて誤検出が多くなってしまふ。図 2 6 (a) に示す床面を撮影した画像から 3 次元距離データを取得した場合を図 2 6 (b) 及び図 2 6 (c) に示す。いずれ左図は、行方向の画素列（距離データ列）から線分を抽出した例、右図は列方向の画素列（距離データ列）から線分を抽出した例を示す。図 2 6 (b) に示すように、閾値  $\max\_d$  を小さくすると、ノイズの影響が大きくなり、ノイズの影響が大きい遠方などにおいては特に、線分をうまく検出することができない。一方、図 2 6 (c) に示すように、従来の線分抽出に更にジグザグ形判別処理を加えた場合、閾値  $\max\_d$  を大きくしても、更にノイズの影響が大きい遠方の領域であっても線分が検出されていることがわかる。

#### 【0131】

図 2 7 及び図 2 8 は、それぞれ異なる階段を撮影した画像から 3 次元距離データを取得して平面検出した例を示す図である。図 2 7 及び図 2 8 に示すように、いずれの場合も全ての踏面を平面として検出できている。また、図 2 8 (b) は、床面の一部も他の平面として検出成功していることを示す。

#### 【0132】

本実施の形態によれば、線分拡張法による平面検出を行う際、始めは大きな閾値を設定して線分を分割し、次に Zig-Zag-Shape 判別処理により、閾値を超えるデータ点を持たない直線であってもジグザグ形である場合には、ノイズではなく、複数平面からなる直線であるとして線分を分割するようにしたので、ノイズを含む距離情報から複数の平面を精度よく検出することが可能となる。

#### 【0133】

このように、小さい段差も精度よく検出することができるため、例えばロボット装置が移動可能な環境内の階段などを認識することができ、二足歩行ロボット装置であれば、この検出結果を利用して階段昇降動作が可能となる。

#### 【0134】

更に、複数の平面によって構成されている凸凹の床面を歩行可能な平面だと誤認識することがなくなり、ロボット装置の移動などが更に簡単になる。

#### 【0135】

なお、本発明は上述した実施の形態のみに限定されるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲において種々の変更が可能であることは勿論である。また、上述した線分抽出処理、ジグザグ形検証処理、領域拡大処理などの各処理のうち 1 以上の任意の処理は、ハードウェアで構成しても、演算器（CPU）にコンピュータプログラムを実行させることで実現してもよい。コンピュータプログラムとする場合には、記録媒体に記録して提供することも可能であり、また、インターネットその他の伝送媒体を介して伝送することにより提供することも可能である。

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【0136】

- 【図 1】 本発明の実施の形態におけるロボット装置の概観を示す斜視図である。
- 【図 2】 上記ロボット装置が具備する関節自由度構成を模式的に示す図である。
- 【図 3】 上記ロボット装置の制御システム構成を示す模式図である。
- 【図 4】 本実施の形態における平面検出装置を示す機能ブロック図である。

【図 5】 上記ロボット装置が外界を撮影している様子を示す模式図である。

【図 6】 階段を示す模式図であって、(a) は階段を正面から見た図、(b) は階段を側面から見た図、(c) は階段を斜めから見た図である。

【図 7】 階段の他の例を示す模式図であって、(a) は階段を正面から見た図、(b) は階段を側面から見た図、(c) は階段を斜めから見た図である。

【図 8】 (a) は図 7 に示す階段をステレオビジョンシステムによって前方から撮影した場合の画像を示す模式図、(b) 乃至 (c) は (a) に示す画像から取得した 3 次元の距離データを示す図である。

【図 9】 (a) は図 7 に示す階段をステレオビジョンシステムによって側方から撮影した場合の画像を示す模式図、(b) 乃至 (c) は (a) に示す画像から取得した 3 次元の距離データを示す図である。

【図 10】 (a) は図 7 に示す階段をステレオビジョンシステムによって斜め前方から撮影した場合の画像を示す模式図、(b) 乃至 (c) は (a) に示す画像から取得した 3 次元の距離データを示す図である。

【図 11】 テクスチャを付与する手段を有しているロボット装置を説明するための図である。

【図 12】 本実施の形態における線分拡張法による平面検出方法を説明する図である。

【図 13】 線分拡張法による平面検出処理を示すフローチャートである。

【図 14】 本実施の形態における線分抽出部における処理の詳細を示すフローチャートである。

【図 15】 距離データ点の分布の様子を示す図であって、(a) はデータの分布が線分に対してジグザグ形である場合、(b) はノイズなどにより線分近傍に一様に分布している場合を示す模式図である。

【図 16】 本実施の形態における Zig-Zag-Shape 判別方法を示すフローチャートである。

【図 17】 上記 Zig-Zag-Shape 判別処理を示す図である。

【図 18】 Zig-Zag-Shape 判別処理を行う処理部を示すブロック図である。

【図 19】 本実施の形態における領域拡張処理を説明するための模式図である。

【図 20】 本実施の形態における領域拡張部における領域種を検索する処理及び領域拡張処理の手順を示すフローチャートである。

【図 21】 端点と直線との距離が等しくても平面方程式の 2 乗平均誤差  $rms$  が異なる例を示す図であって、(a) はノイズなどの影響により線分が平面からずれている場合、(b) は線分が属する他の平面が存在する場合を示す模式図である。

【図 22】 領域種の選択処理を示す図である。

【図 23】 領域拡張処理を示す図である。

【図 24】 (a) は、ロボット装置が立った状態で床面を見下ろした際の床面を示す模式図、(b) は、縦軸を  $x$ 、横軸を  $y$ 、各データ点の濃淡で  $z$  軸を表現して 3 次元距離データ及び、行方向の画素列から線分抽出処理にて同一平面に存在するとされるデータ点群から直線を検出したものを示す図である。

【図 25】 床面に段差を一段置いたときの本実施の形態における平面検出方法と従来の平面検出方法との結果の違いを説明するための図であって、(a) は観察された画像を示す模式図、(b) は実験条件を示す図、(c) は本実施の形態における平面検出方法により平面検出された結果を示す図、(d) 従来の平面検出方法により平面検出された結果を示す図である。

【図 26】 (a) は床面を撮影した画像を示す模式図、(b) 及び (c) は、(a) に示す床面を撮影して取得した 3 次元距離データから水平方向及び垂直方向の距離データ点列から、それぞれ本実施の形態の線分検出により検出した線分及び従来の線分検出により検出した線分を示す図である。

【図 27】 (a) は階段を撮影した画像を示す模式図、(b) 乃至 (d) は、(a)

から取得した3次元距離データを使用して、それぞれ上面、正面、側面から平面を検出した例を示す図である。

【図28】(a)は他の階段を撮影した画像を示す模式図、(b)乃至(d)は、(a)から取得した3次元距離データを使用して、それぞれ上面、正面、側面から平面を検出した例を示す図である。

【図29】(a)は階段を撮影した画像を示す模式図、(b)は(a)から取得した3次元距離データから4つの平面領域A、B、C、Dを検出した結果を示す図である。

。

【図30】under-segmentationを説明するための模式図である。

【図31】(a)乃至(d)は、ハフ変換により平面を抽出する方法を説明する図であり、それぞれ階段を示す図、(a)に示す階段から得られた3次元距離データを示す図、(b)の距離データをハフ変換して求めたヒストグラムを示す図、(c)に示すピークが示す平面と実際の平面との比較結果を示す図である。

【図32】線分拡張法による平面検出処理を示すフローチャートである。

【図33】従来の線分を抽出する処理を説明する図であって、(a)乃至(c)は、その処理工程順に示す図である。

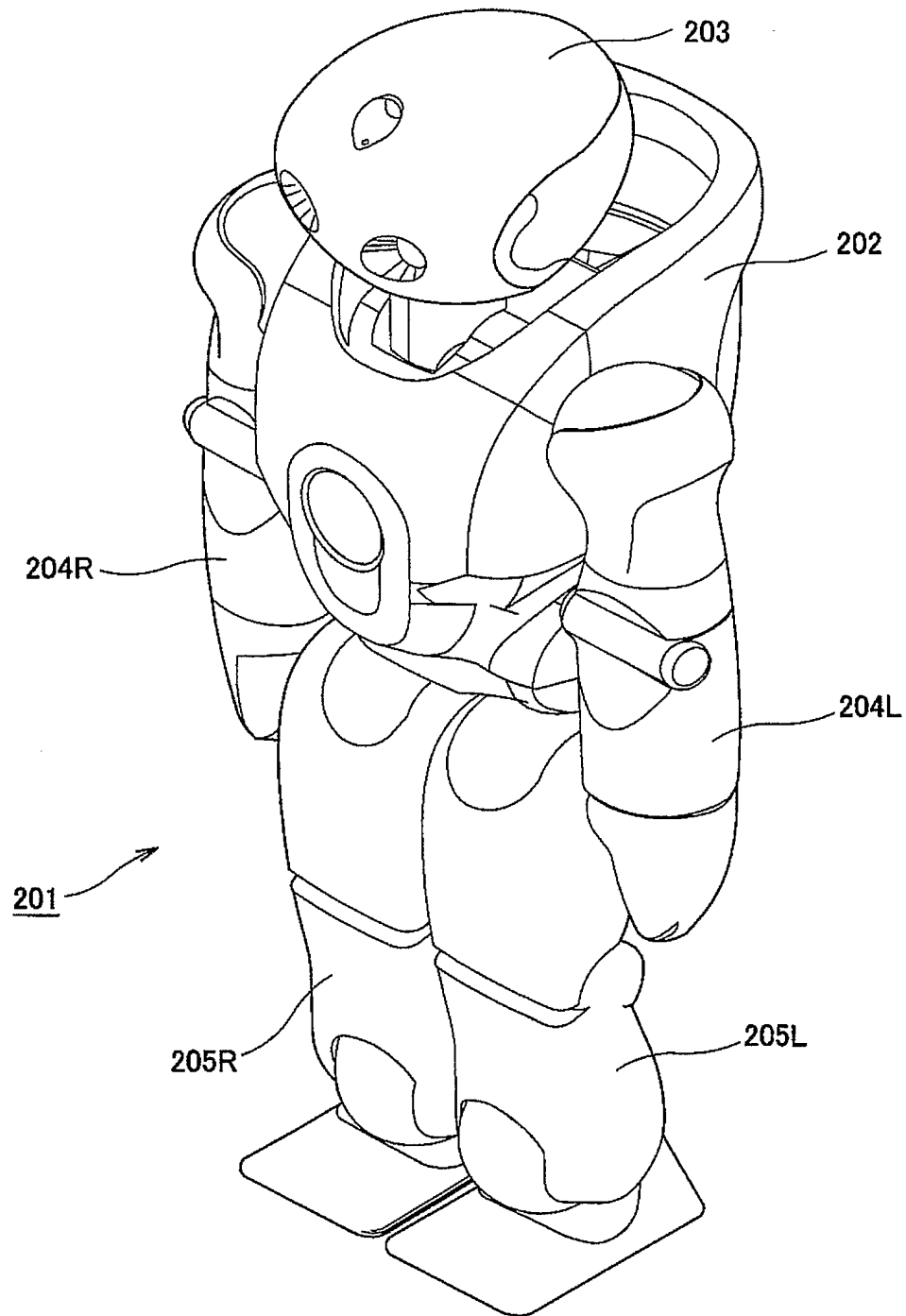
【図34】(a)及び(b)は、それぞれノイズが少ない計測データ点群及びノイズが多い計測データ点群に対し、2つの閾値設定をした場合における線分抽出処理の結果の相違を示す図である。

#### 【符号の説明】

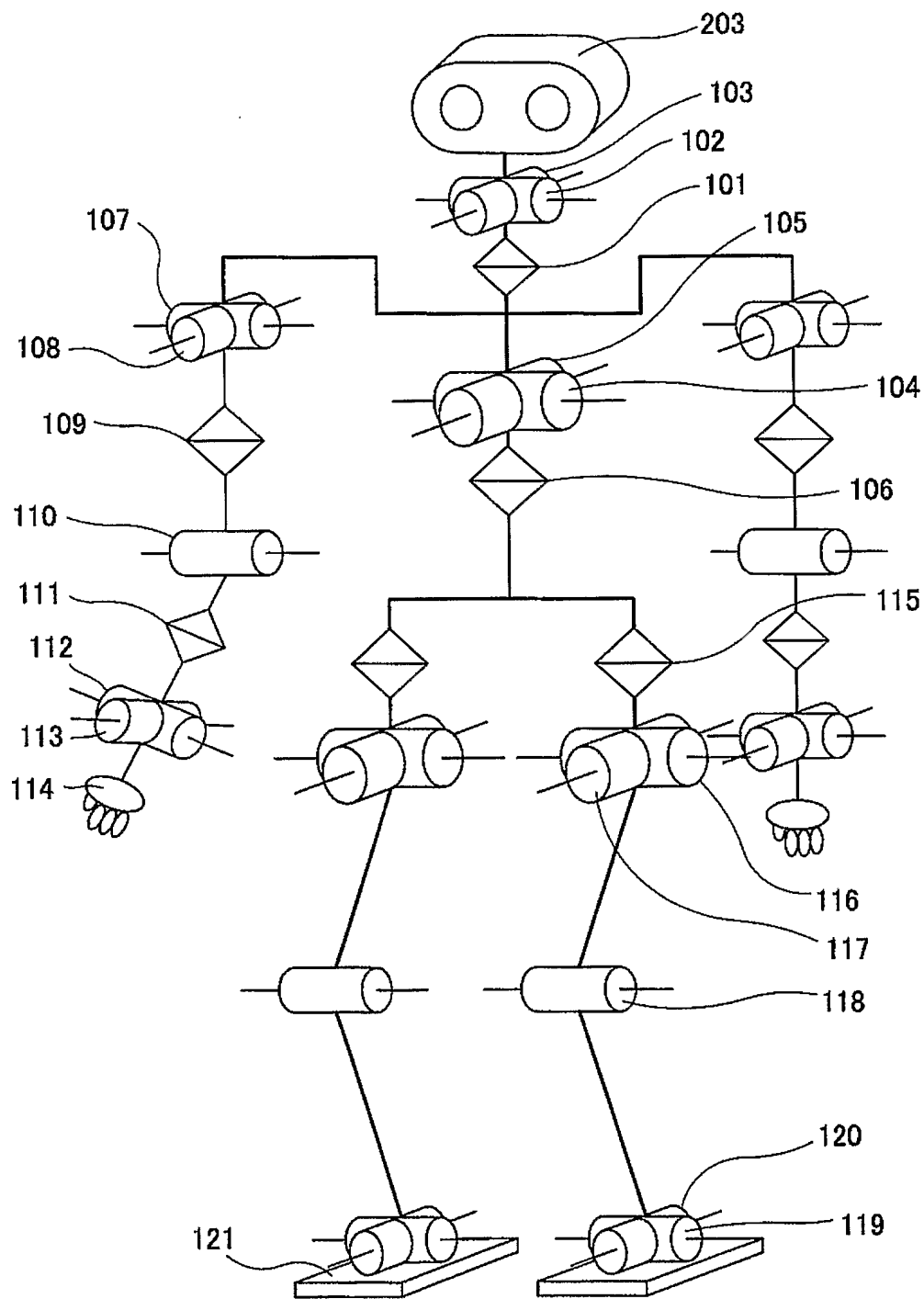
##### 【0137】

1 平面検出装置、2 ステレオビジョン、2 ステレオビジョンシステム、3 平面検出部、4 線分抽出部、5 領域拡張部、11 R/L ステレオカメラ、12 光源、20 判別処理部、21 方向判別部、22 遅延部、23 比較部、24 カウンタ、25 比較部、26 最小データ点数格納部、30 画像、101 首関節ヨー軸、102 首関節ピッチ軸、103 首関節ロール軸、104 体幹ピッチ軸、105 体幹ロール軸、106 体幹ヨー軸、107 肩関節ピッチ軸、108 肩関節ロール軸、109 上腕ヨー軸、110 肘関節ピッチ軸、111 前腕ヨー軸、112 手首関節ピッチ軸、113 手首関節ロール軸、114 手部、115 股関節ヨー軸、116 股関節ピッチ軸、117 股関節ロール軸、118 膝関節ピッチ軸、119 足首関節ピッチ軸、120 足首関節ロール軸、121 足底、200 思考制御モジュール、200 運動制御モジュール、201 ロボット装置、202 体幹部ユニット、203 頭部ユニット、204 R/L 腕部ユニット、205 R/L 脚部ユニット、210, 310 インターフェース、251 画像入力装置、251 画像入力部、252 音声入力装置、300 運動制御モジュール、314 外部記憶装置、350 アクチュエータ、351 姿勢センサ、352, 353 接地確認センサ、354 電源制御装置

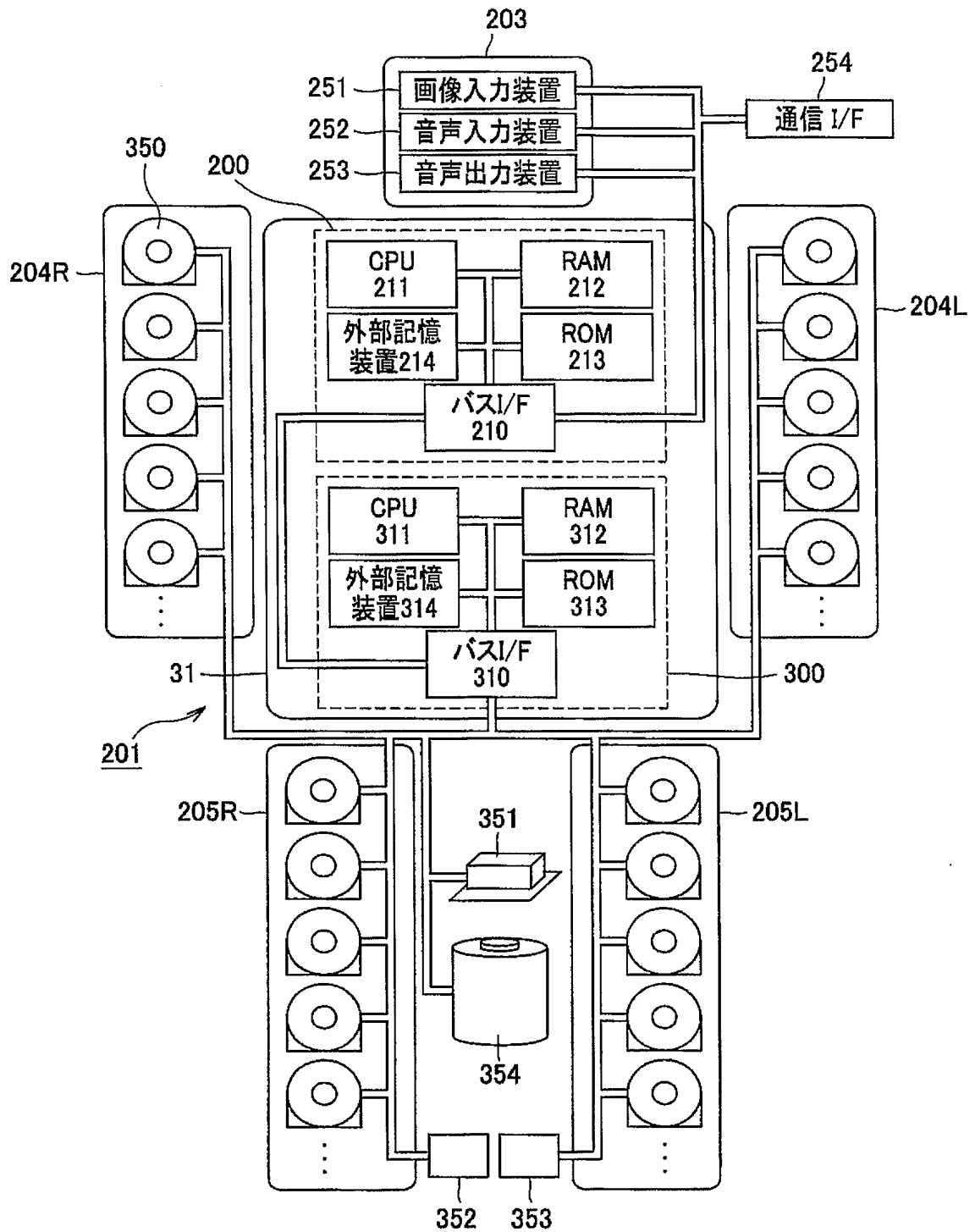
【書類名】 図面  
【図 1】



【図 2】

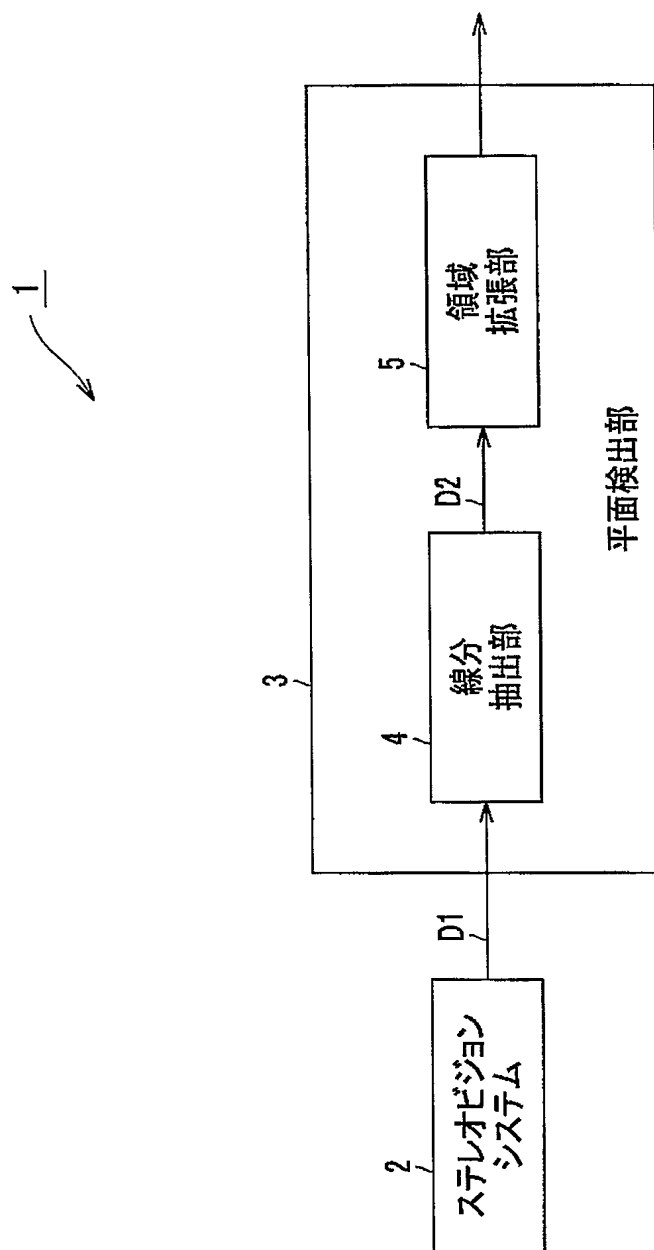


【図 3】

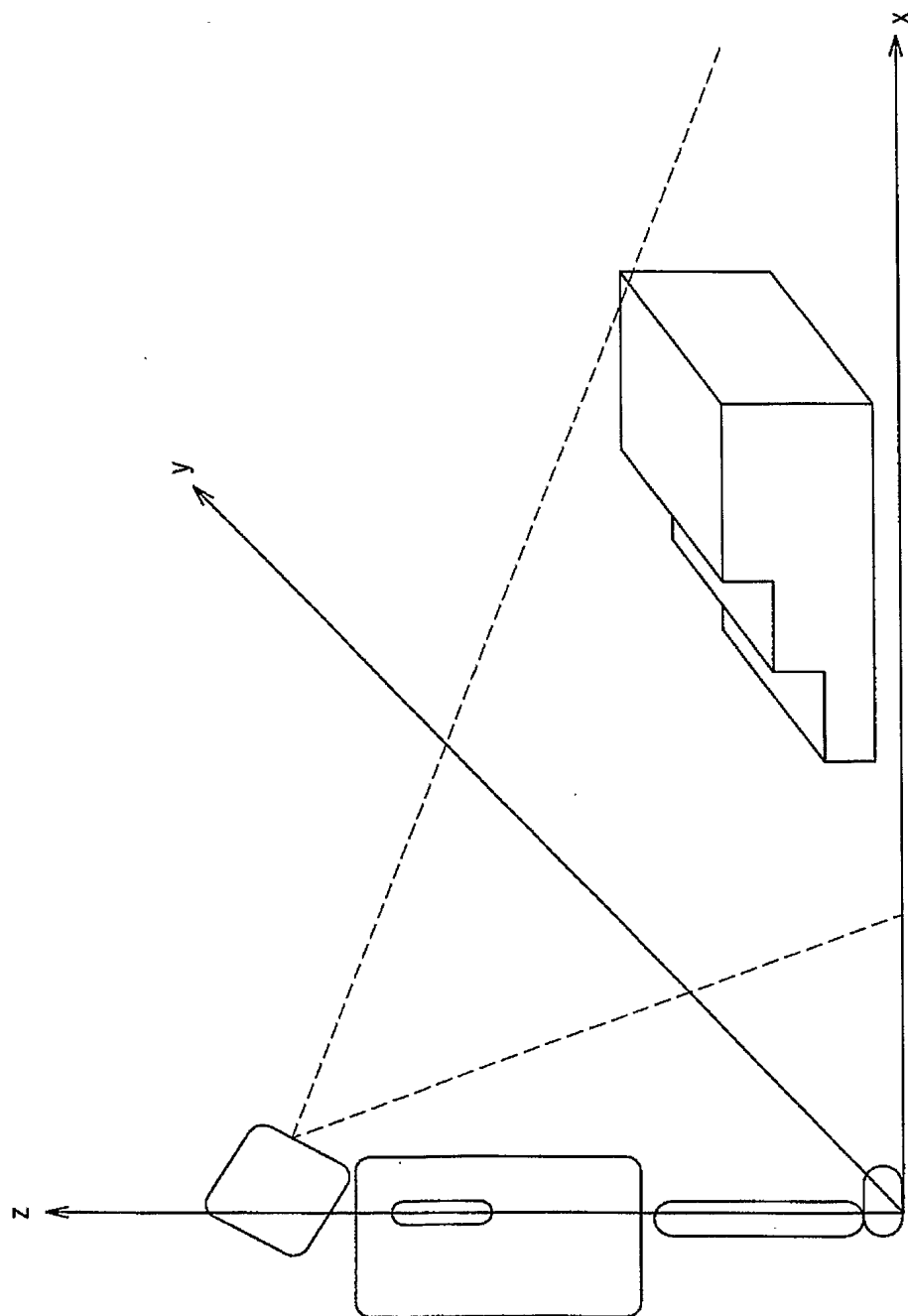




【図 4】

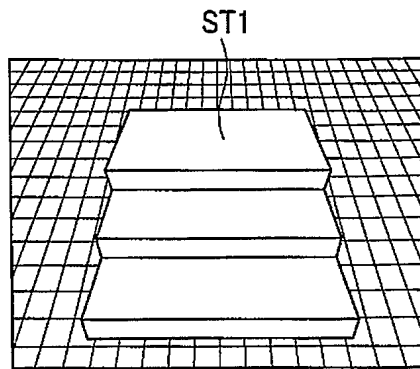


【図 5】

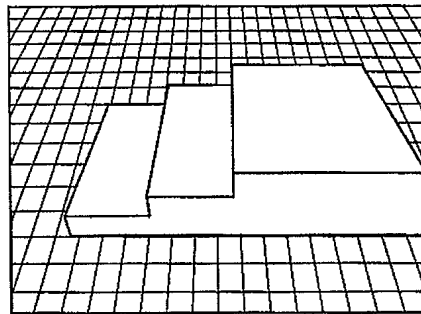


【図 6】

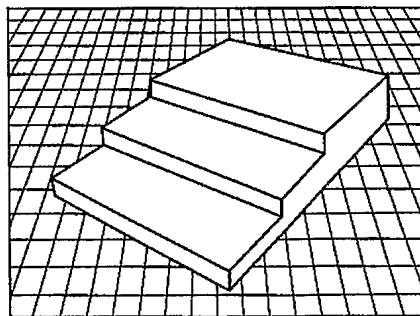
(a)



(b)



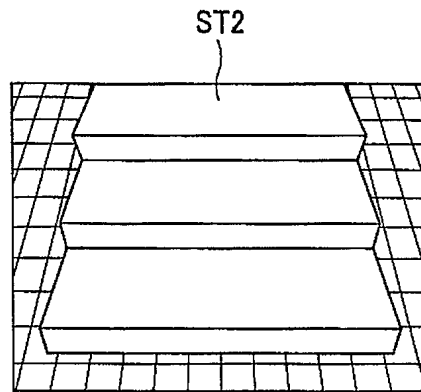
(c)



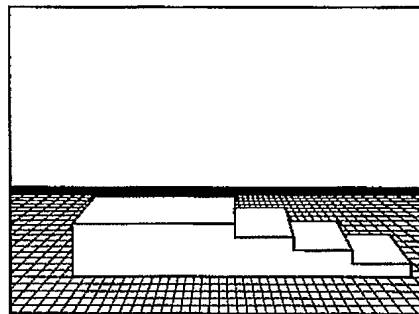
4cm × 30cm × 10cm/21cm

【図 7】

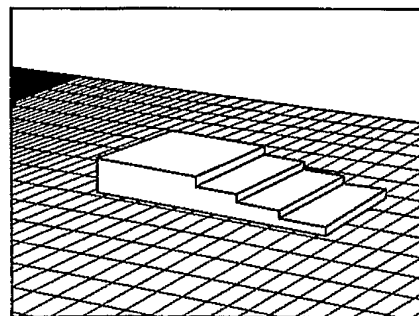
(a)



(b)

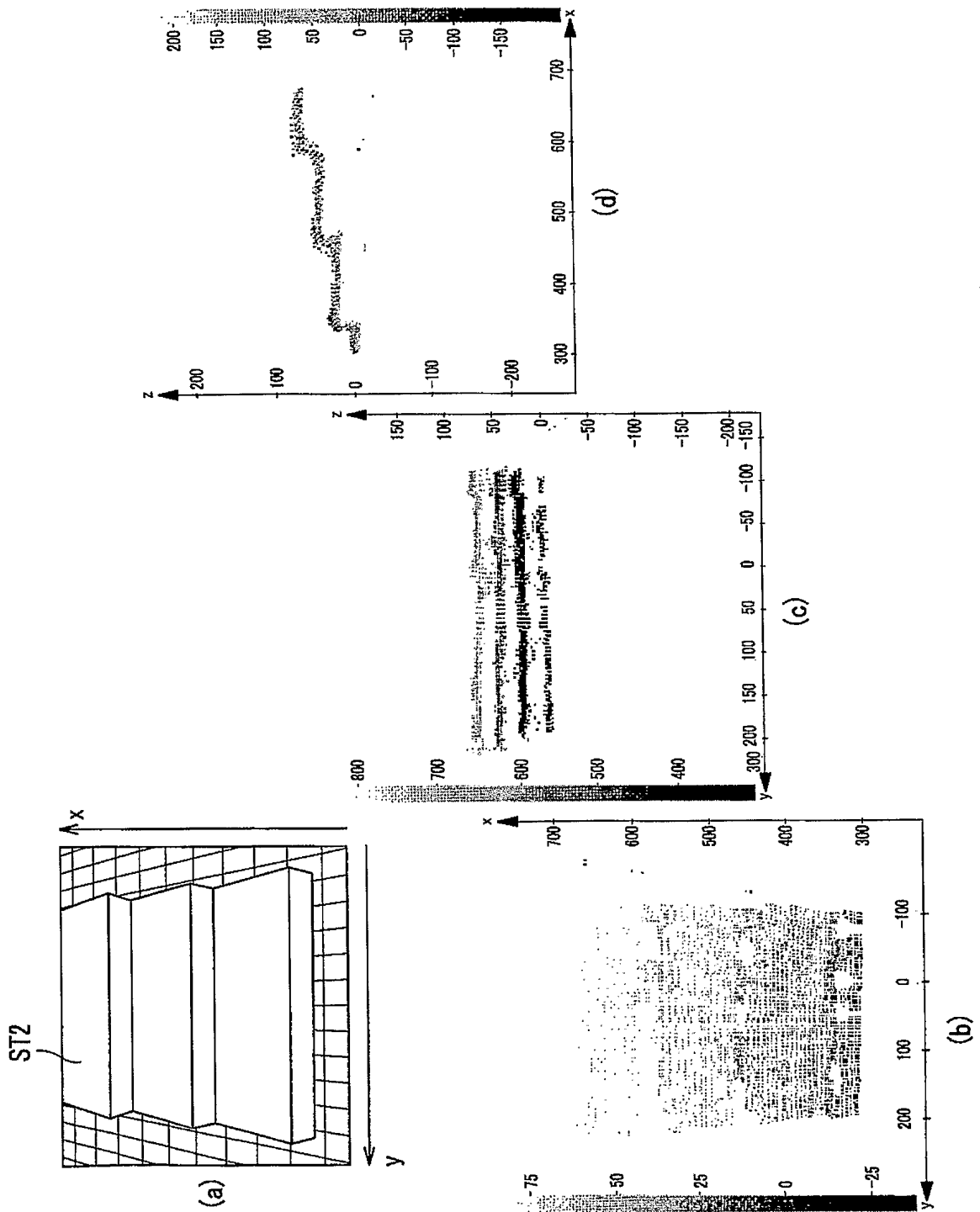


(c)

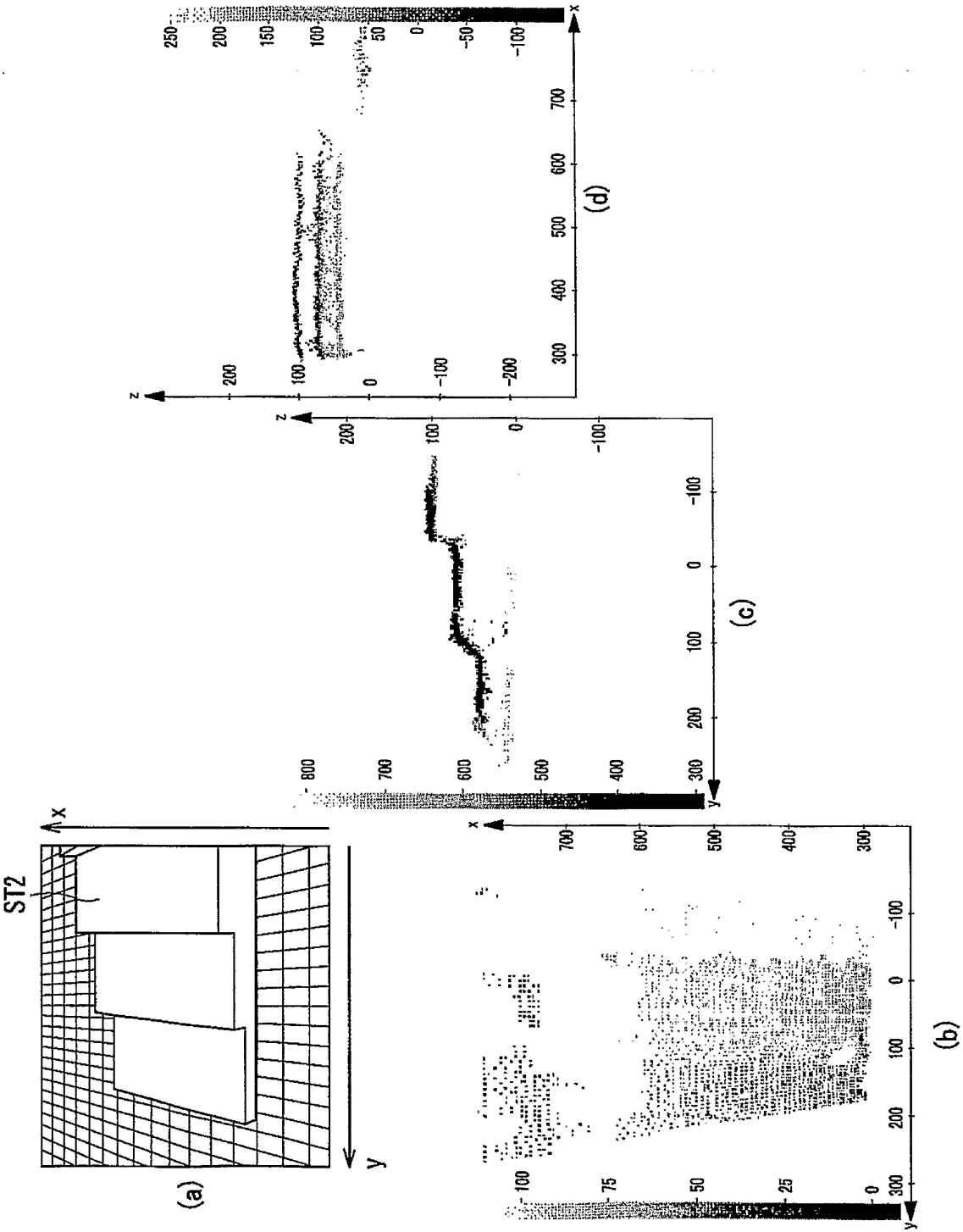


3cm × 33cm × 12cm/32cm

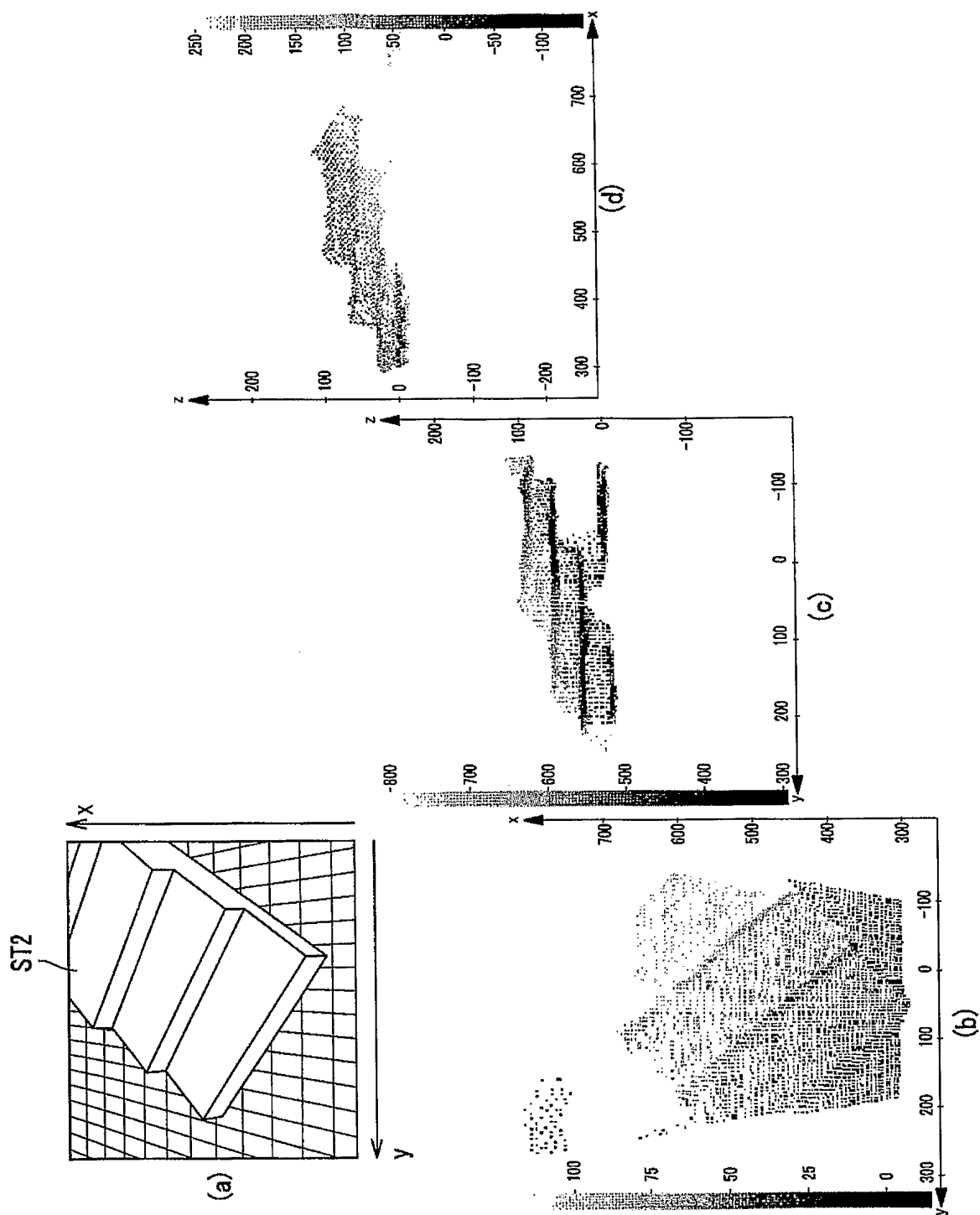
【図 8】



【図 9】



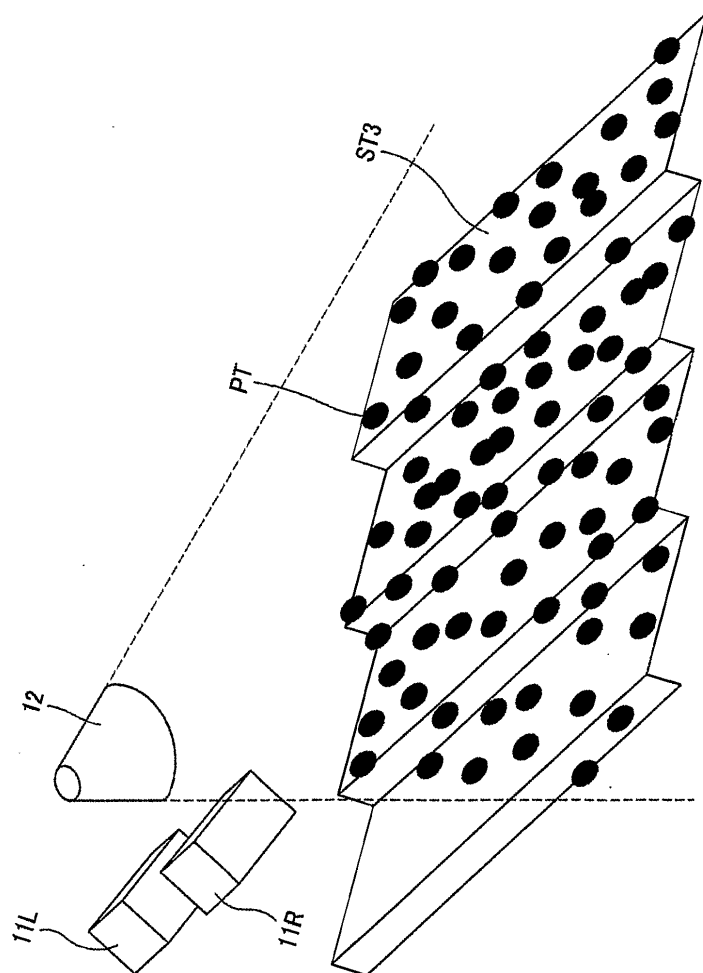
【図 10】



【図11】

特願2004-077215

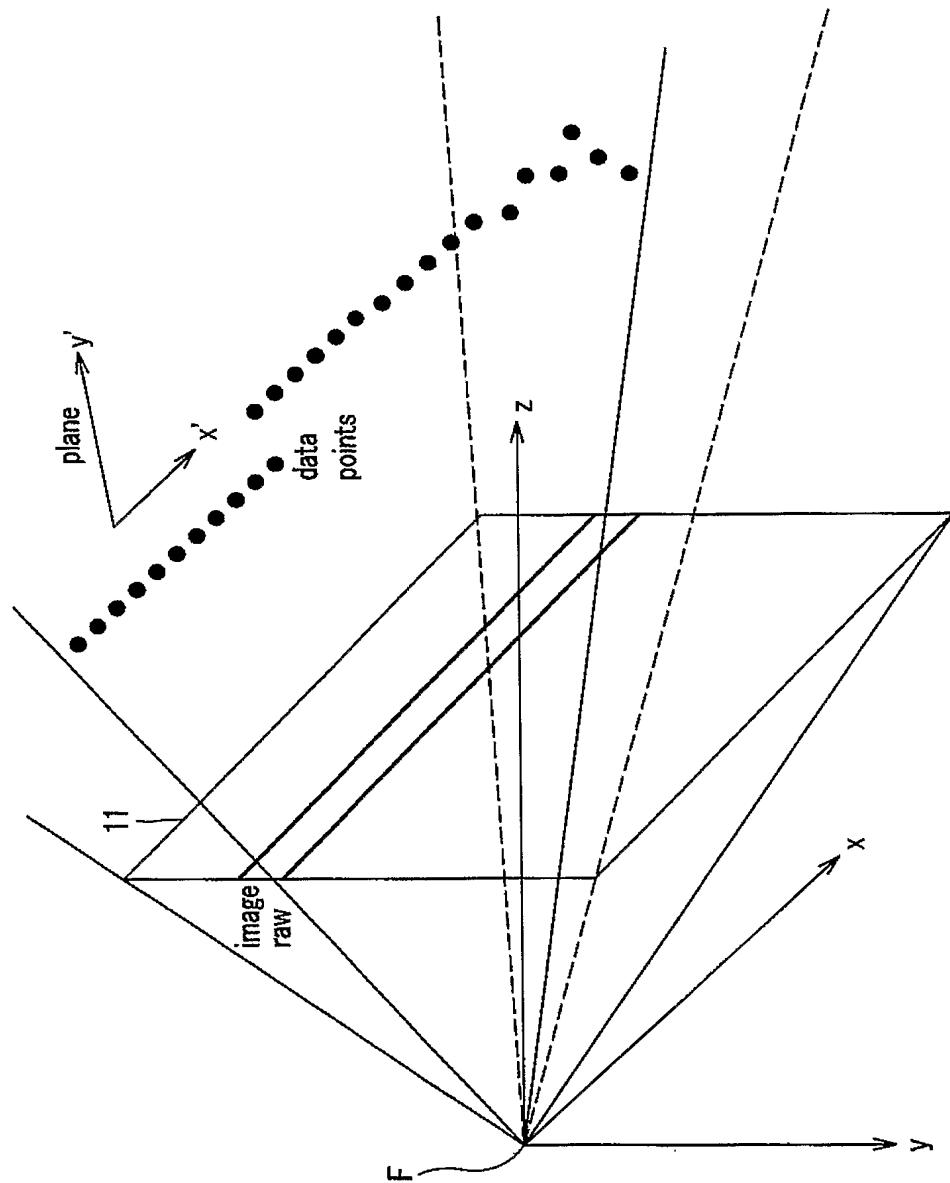
ページ: 11/



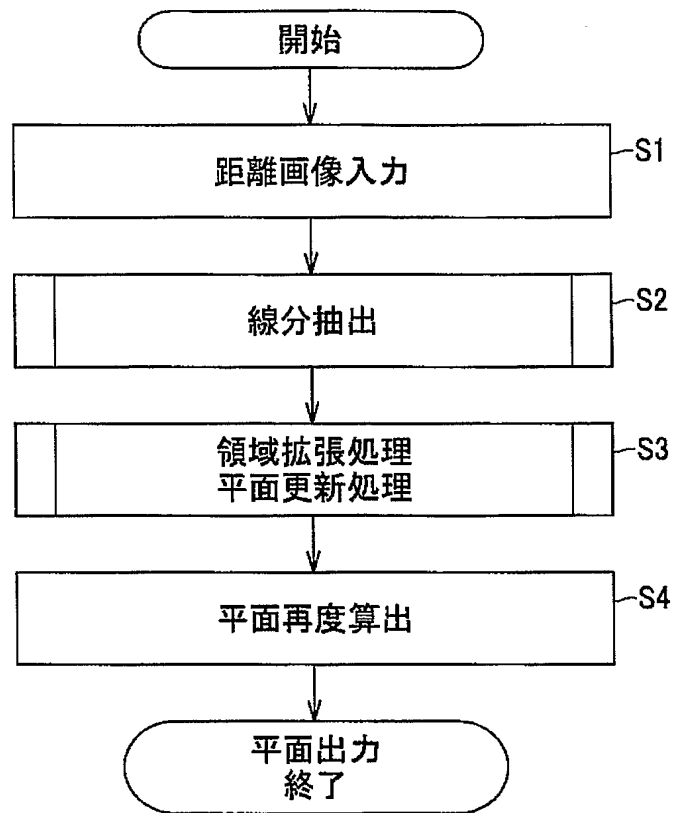
出証特2004-3112150



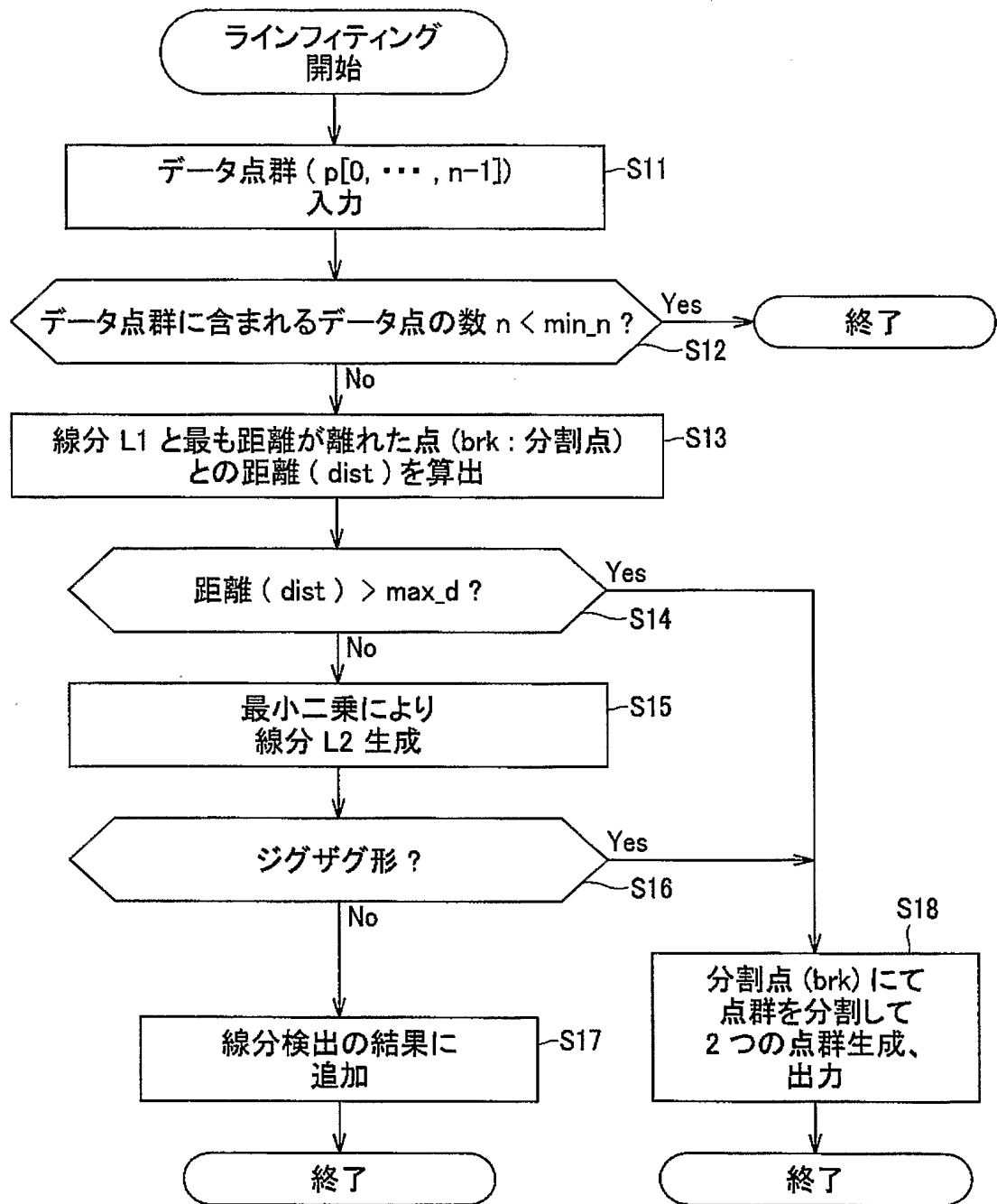
【図 12】



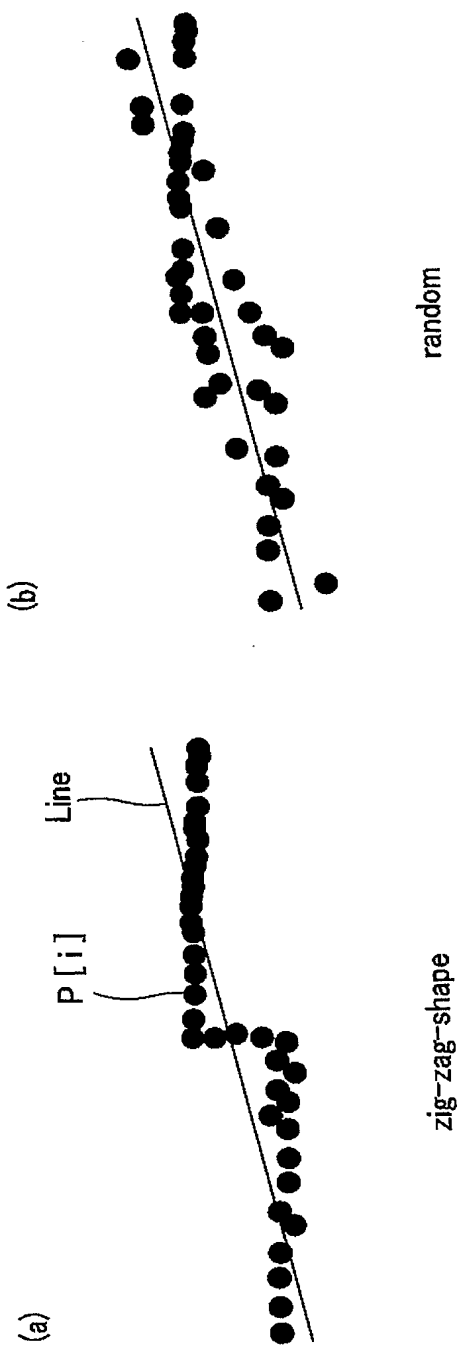
【図 13】



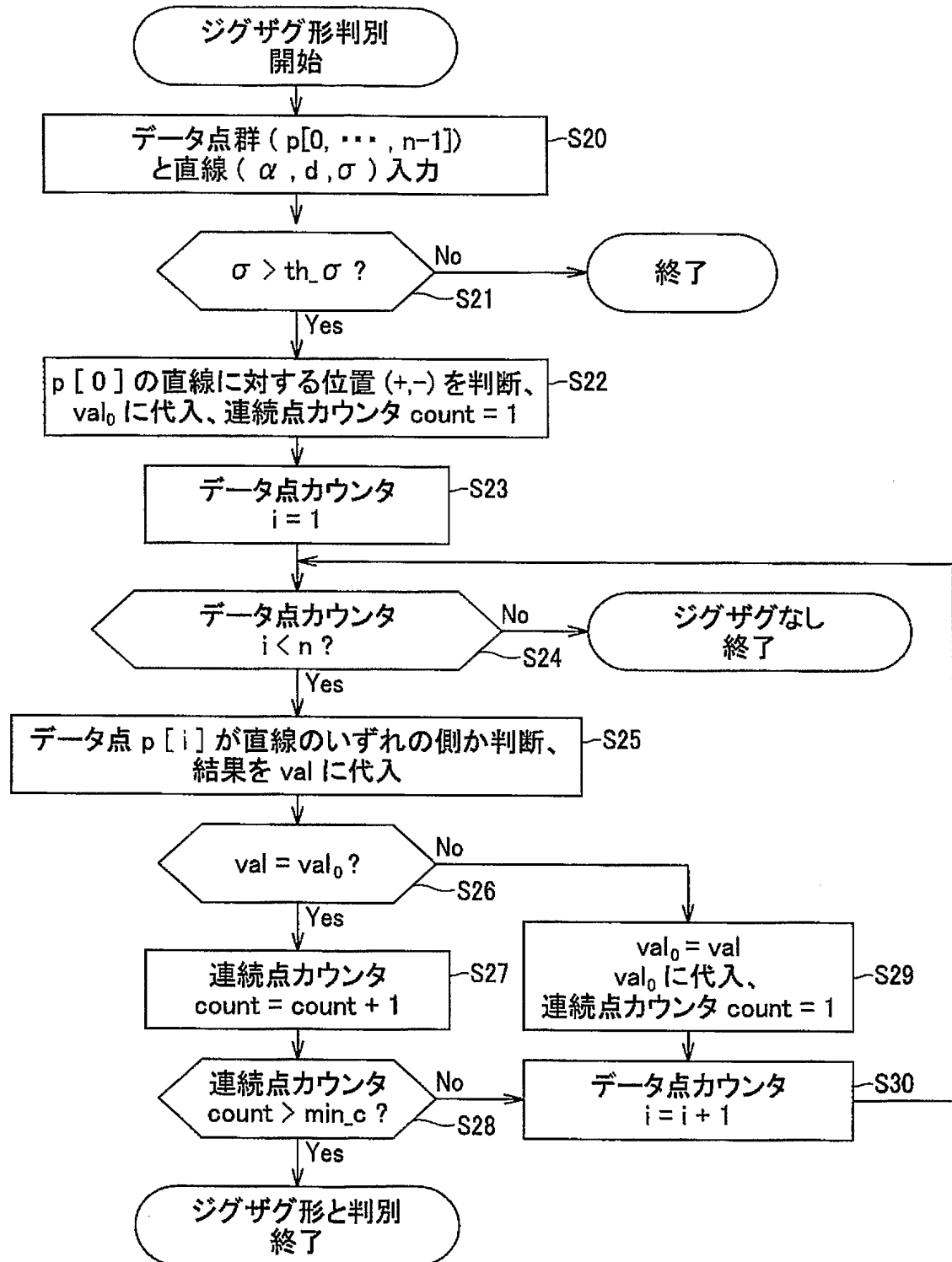
【図 14】



【図 15】



【図 16】



【図 17】

Input:  $pts$ : vector of points,  $n$ : number of points,  $\alpha$ ,  $d$ ,  $\sigma$ : parameters and std-dev of fitted line.

Output: true if curve contains a zig-zag shape, false otherwise.

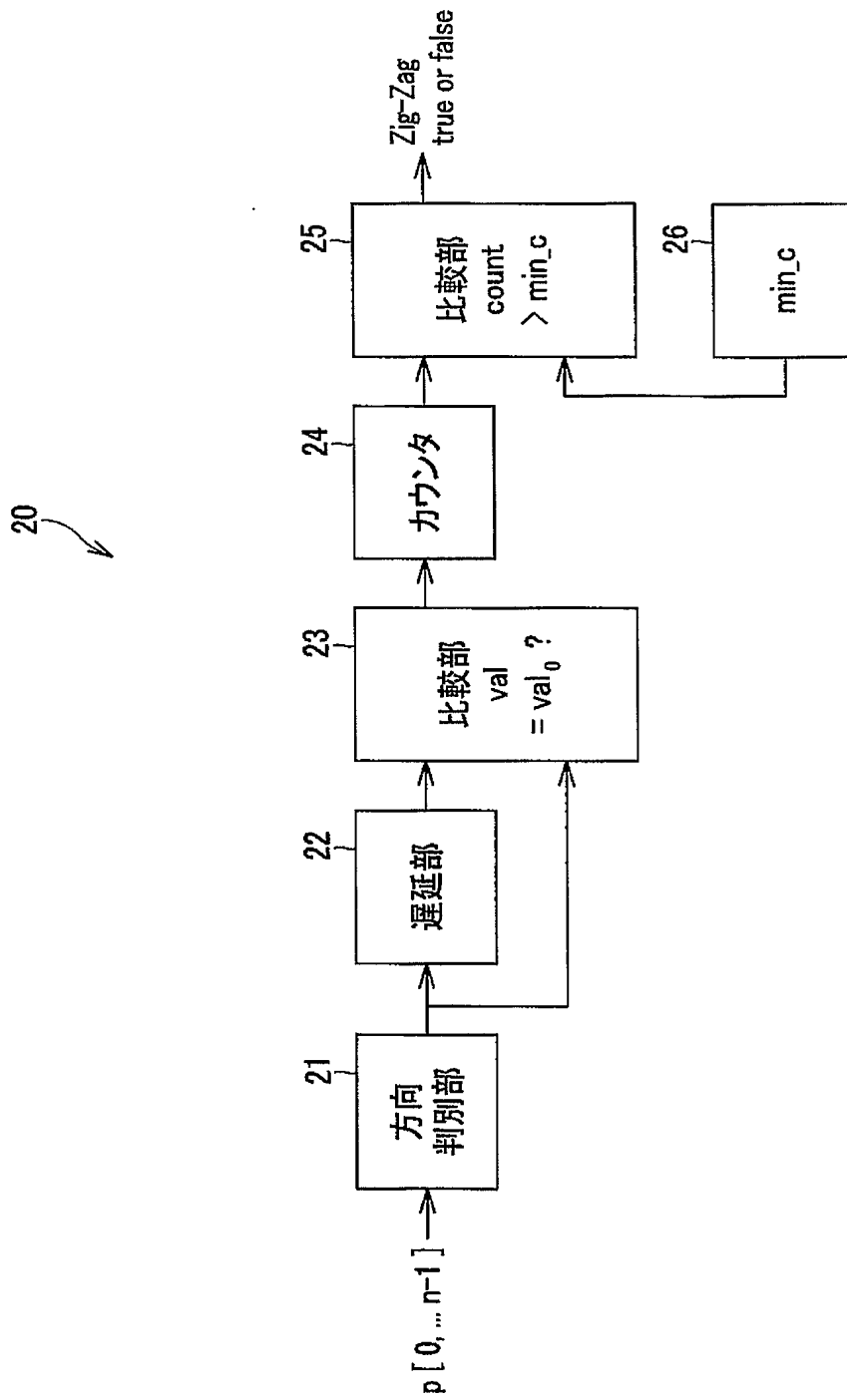
Sequence:

```

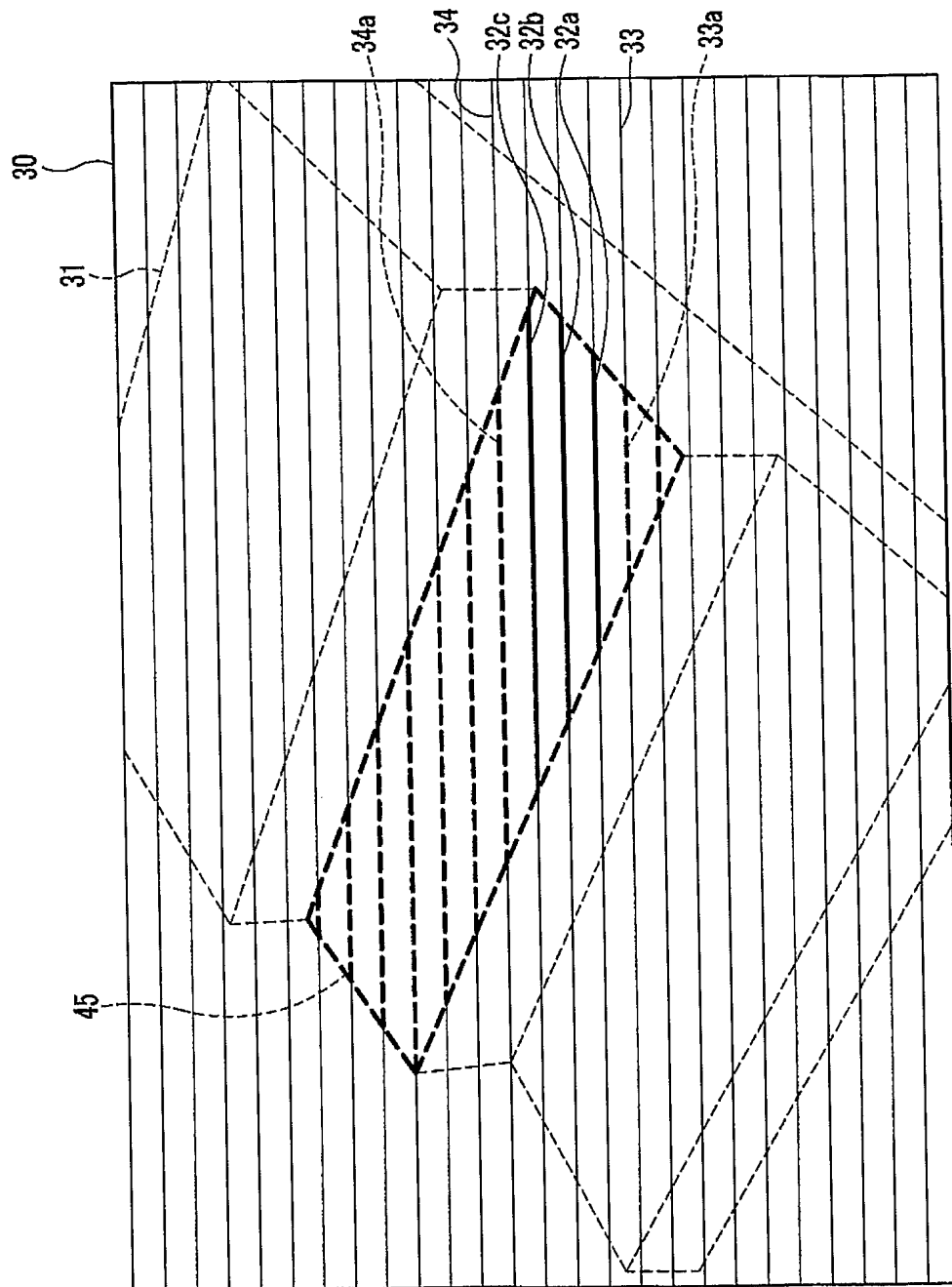
    if  $\sigma > thresh\sigma$  then
         $val0 = pts[0].x * \cos \alpha + pts[0].y * \sin \alpha + d$ 
         $count = 1$ 
        for  $i = 1$  to  $(n-1)$  do
             $val = pts[i].x * \cos \alpha + pts[i].y * \sin \alpha + d$ 
            if ( $val * val0 \leq 0$ ) then
                 $val0 = val$ 
                 $count = 1$ 
            else
                 $count = count + 1$ 
            if ( $count \geq min\_points\_for\_zig\_zag\_shape$ ) then
                return true
            endif
        endif
    endfor
    endif
    return false

```

【図 18】

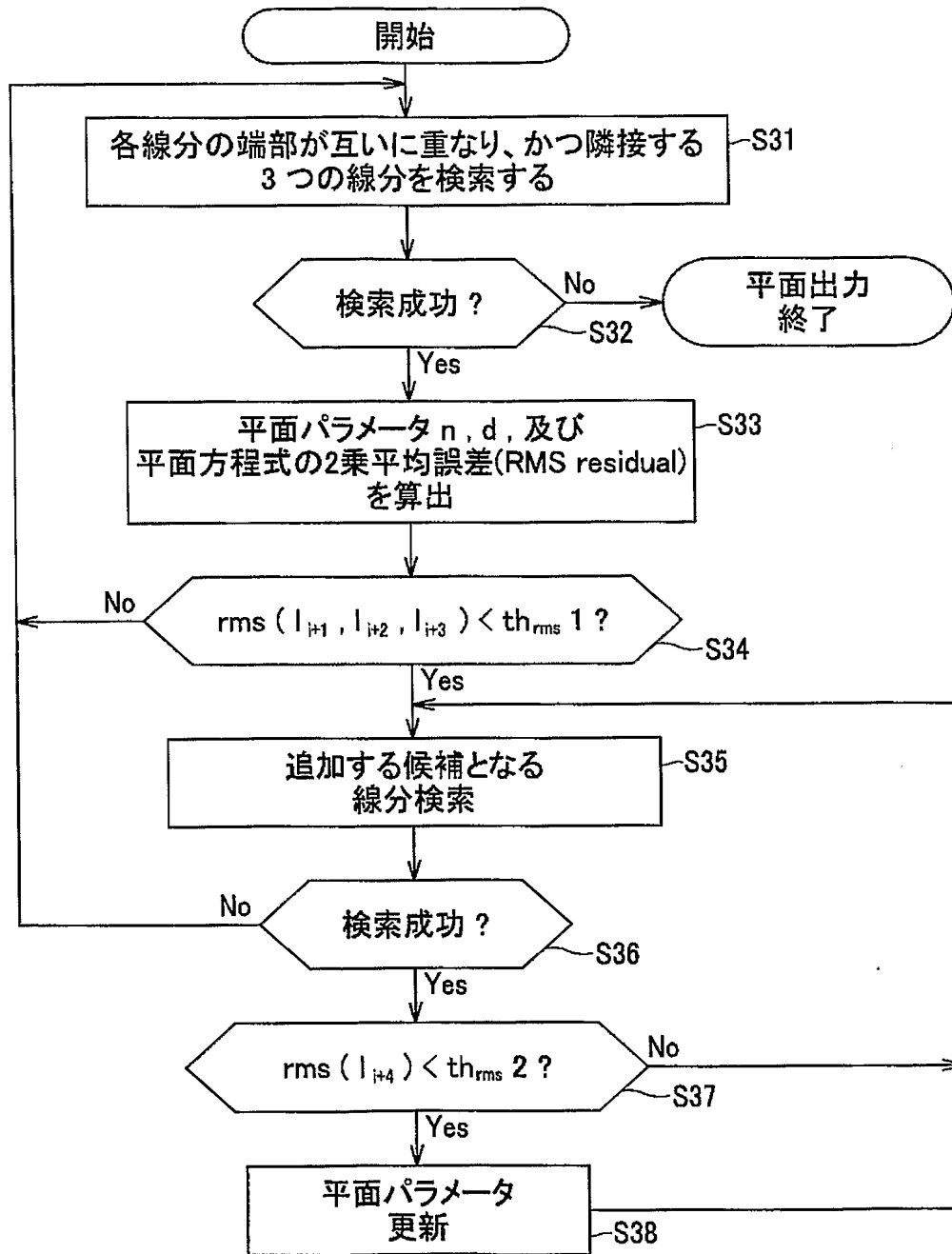


【図 19】

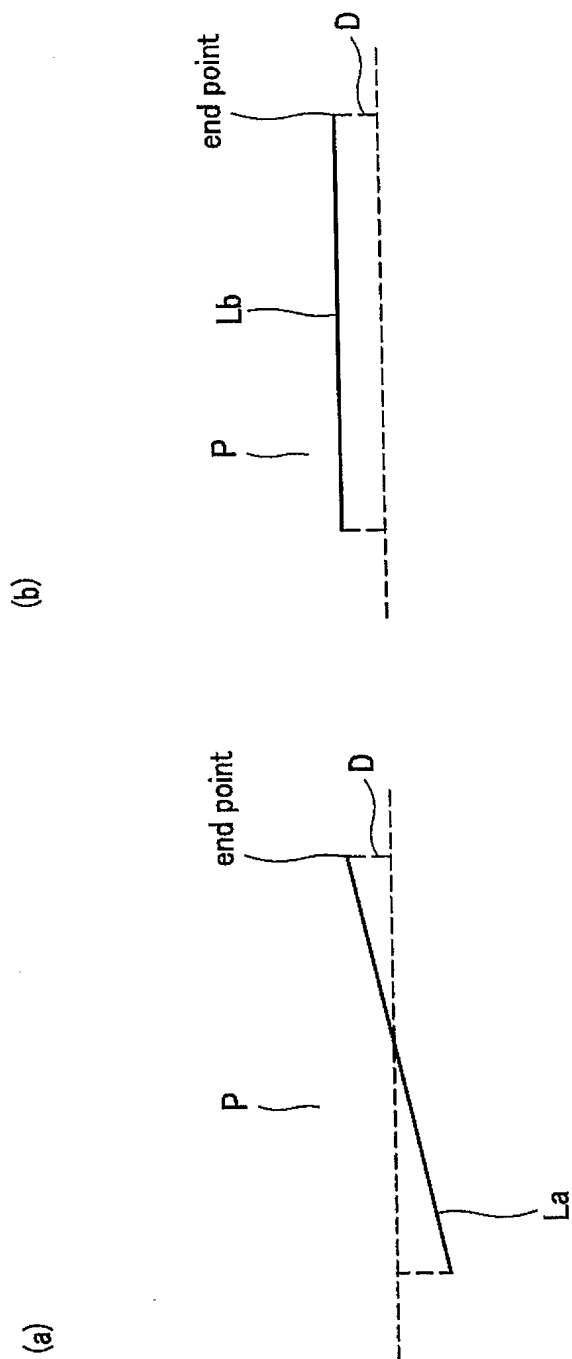




【図 20】



【図 21】



【図 2 2】

Algorithm *FindSeedRegion*Input: *lines[i]*: vector of lines for each image row (or column) *i*,*n*: number of image rows (or columns)

Output: set of lines (seed region) or empty set (no seed found).

Sequence:

```

for i = 0 to (n-3) do
  for l1 in lines[i] do
    for l2 in lines[i+1] do
      for l3 in lines[i+2] do
        if overlap(l1, l2) and overlap(l2, l3) then
          (n, d) = fitPlane(l1, l2, l3)
          if rms(l1, l2, l3) < threshlrms then
            seed = {l1, l2, l3}
            remove(l1, l2, l3)
            return seed
          endif
        endif
      endfor
    endfor
  endfor
endfor
return {}

```

## 【図 2 3】

Algorithm *RegionGrowing*

Input: *region*: set of lines as seed region,

*lines[i]*: vector of lines for each image row (or column) *i*,

*n*: number of image rows (or columns)

Sequence:

$A = 0, b = 0$

for *l* in *region* do  $(A, b) = add(A, b, l)$  endfor

$(n, d) = solve(A, b)$

*open* = *region*

while not empty(*open*) do

$l_1 = select(open), open = open - \{l_1\}$

for *i* in neighbor(index(*l*<sub>1</sub>)) do

for *l*<sub>2</sub> in *lines*[*i*] do

if overlap(*l*<sub>1</sub>, *l*<sub>2</sub>) and  $rms(l_2) < thresh2_{rms}$  then

*region* = *region* + {*l*<sub>2</sub>},

$(A, b) = add(A, b, l_2), (n, d) = solve(A, b)$

*open* = *open* + {*l*<sub>2</sub>}

remove(*l*<sub>2</sub>)

endif

endfor

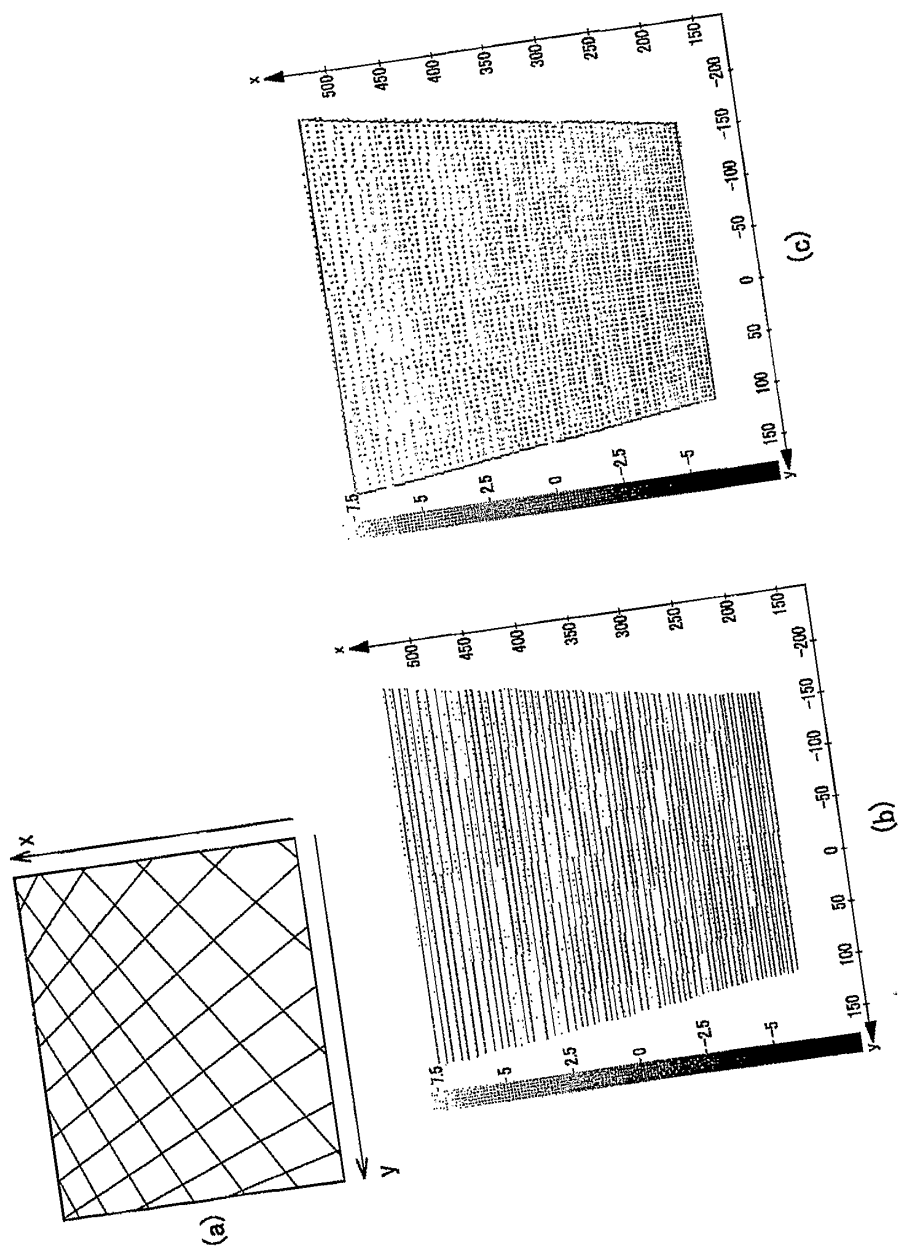
endfor

endfor

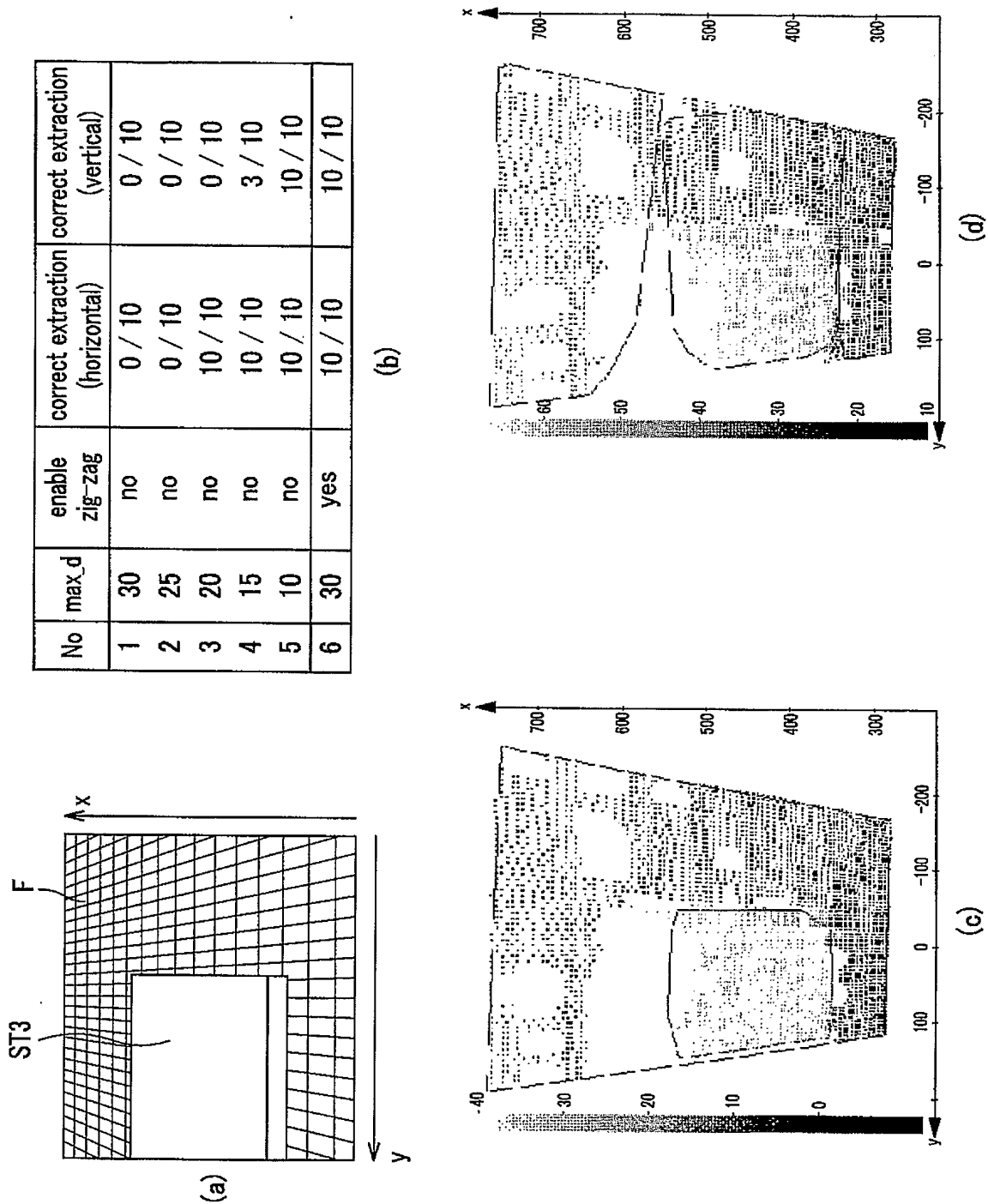
*plane* = {*n, d, A, b, region*}

*planes* = *planes* + {*plane*}

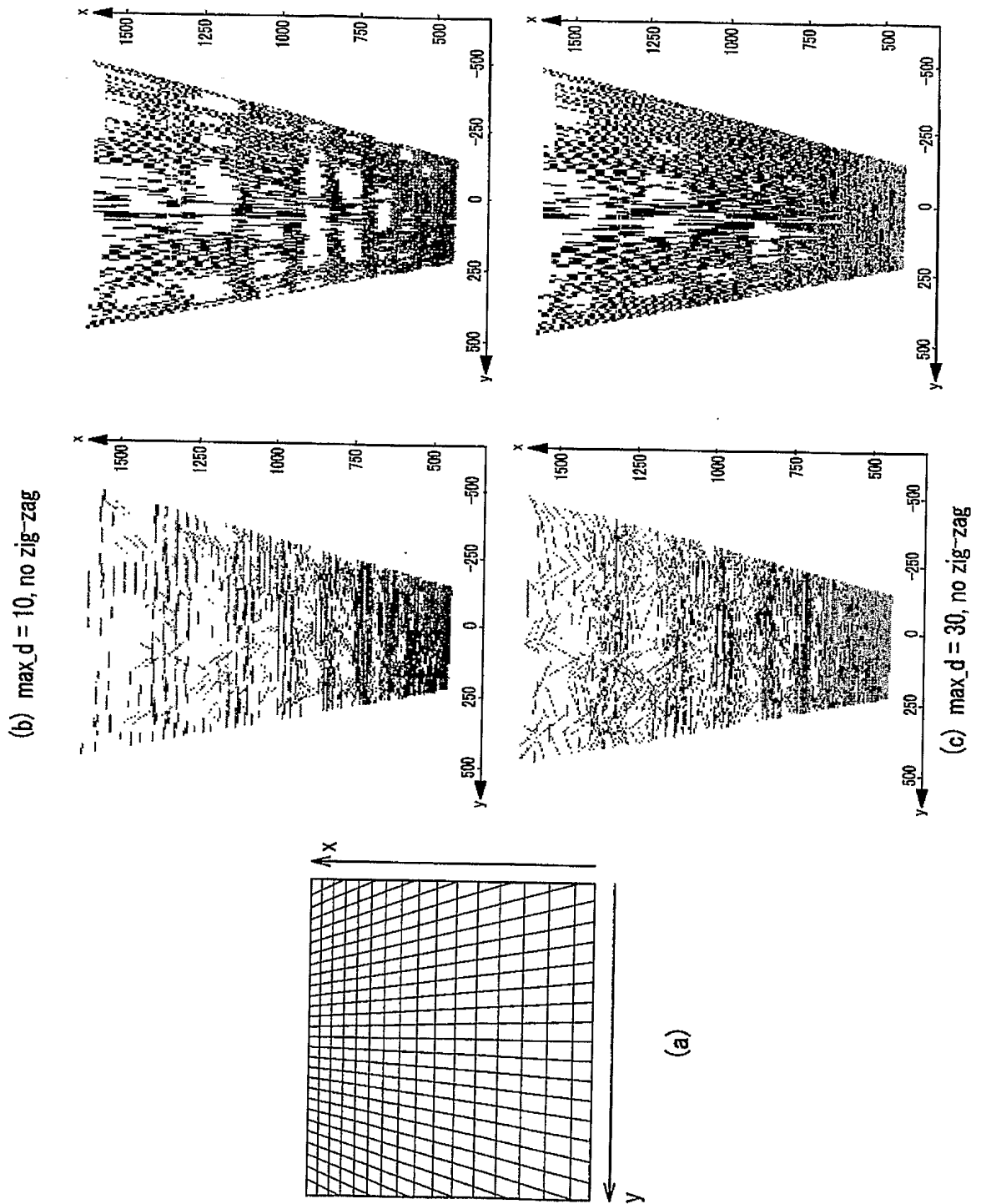
【図 24】



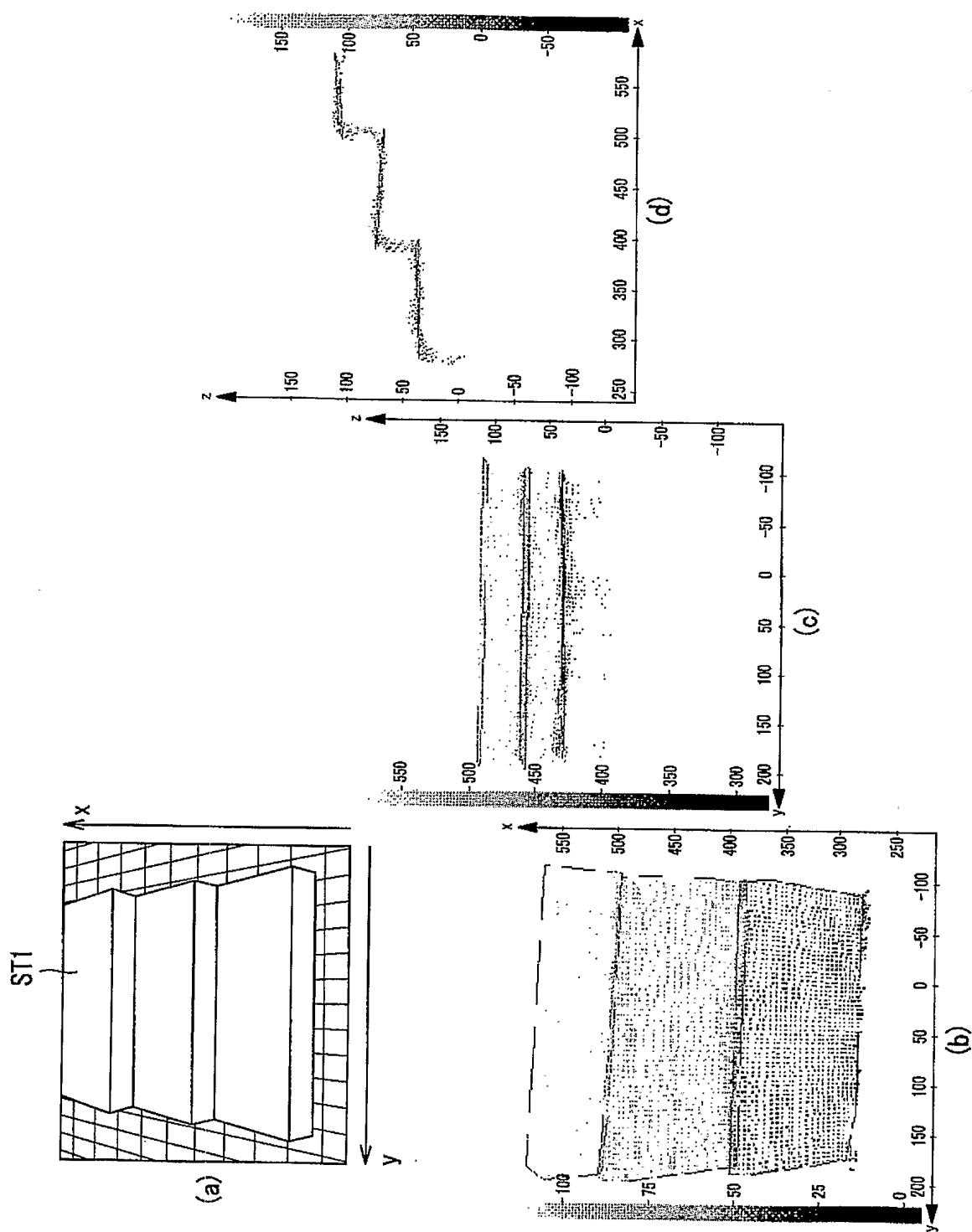
【図 25】



【図 26】

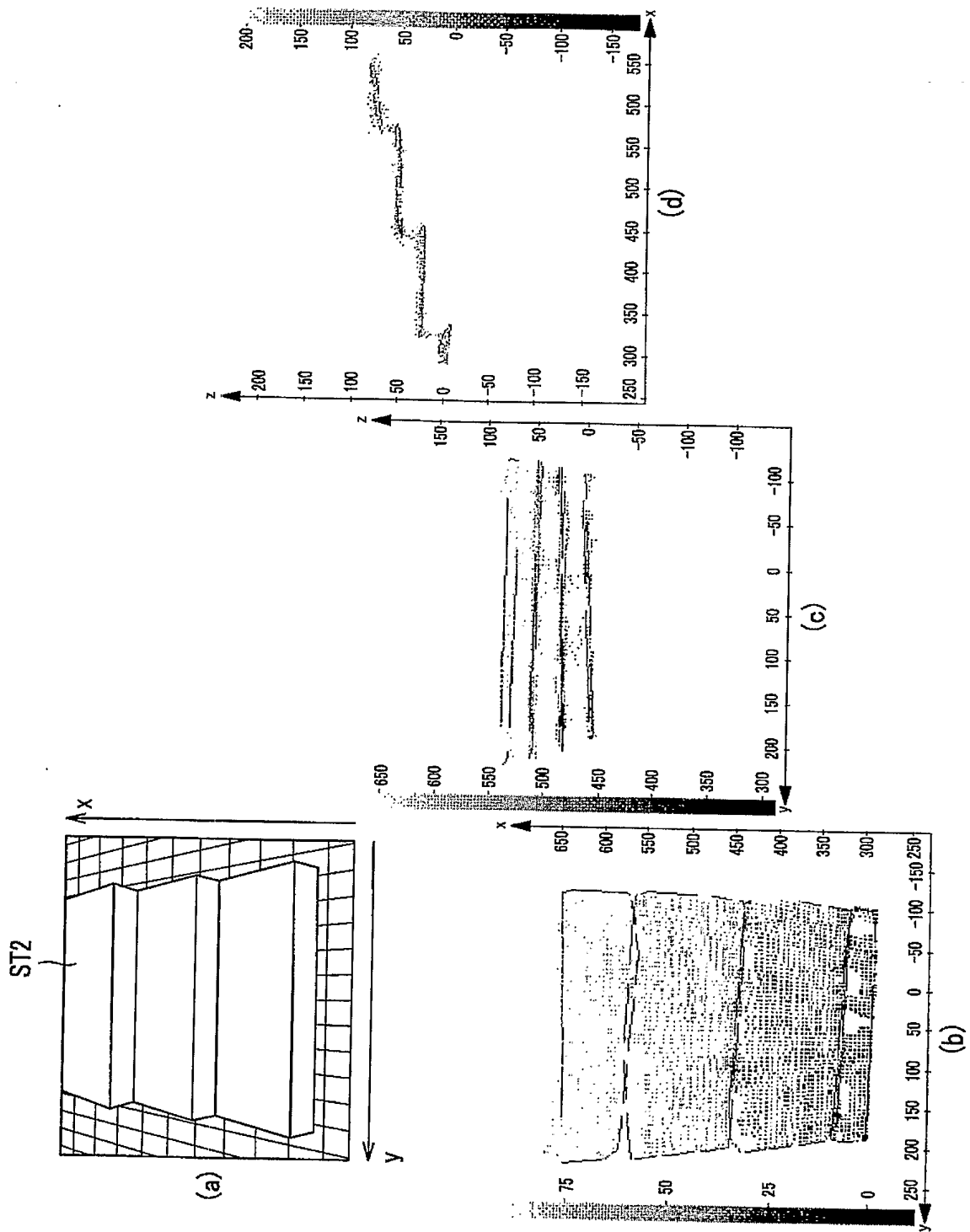


【図 27】

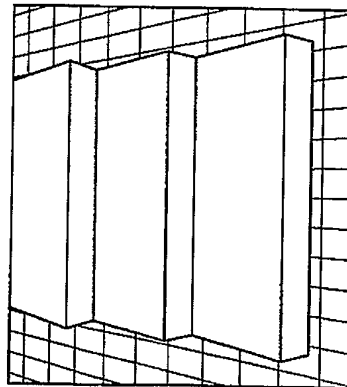
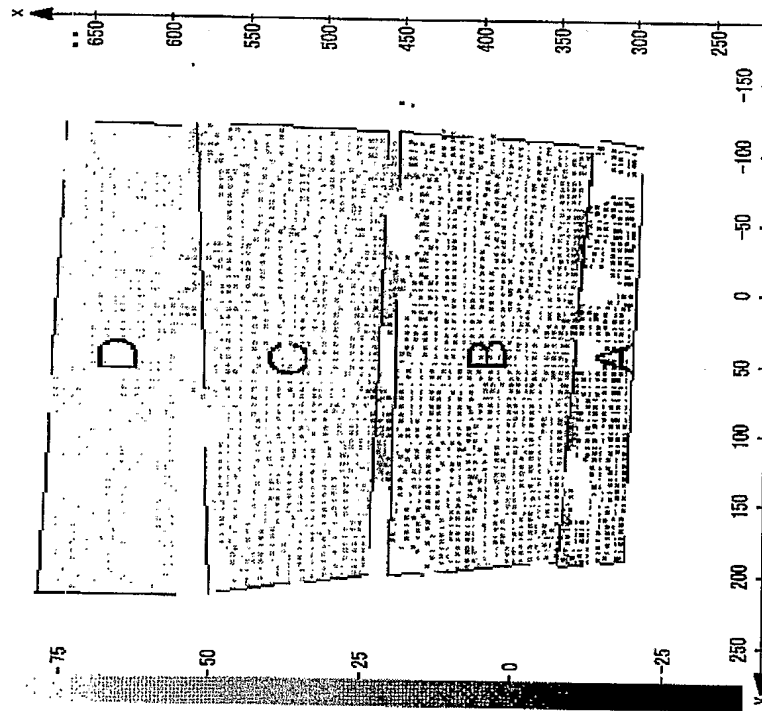




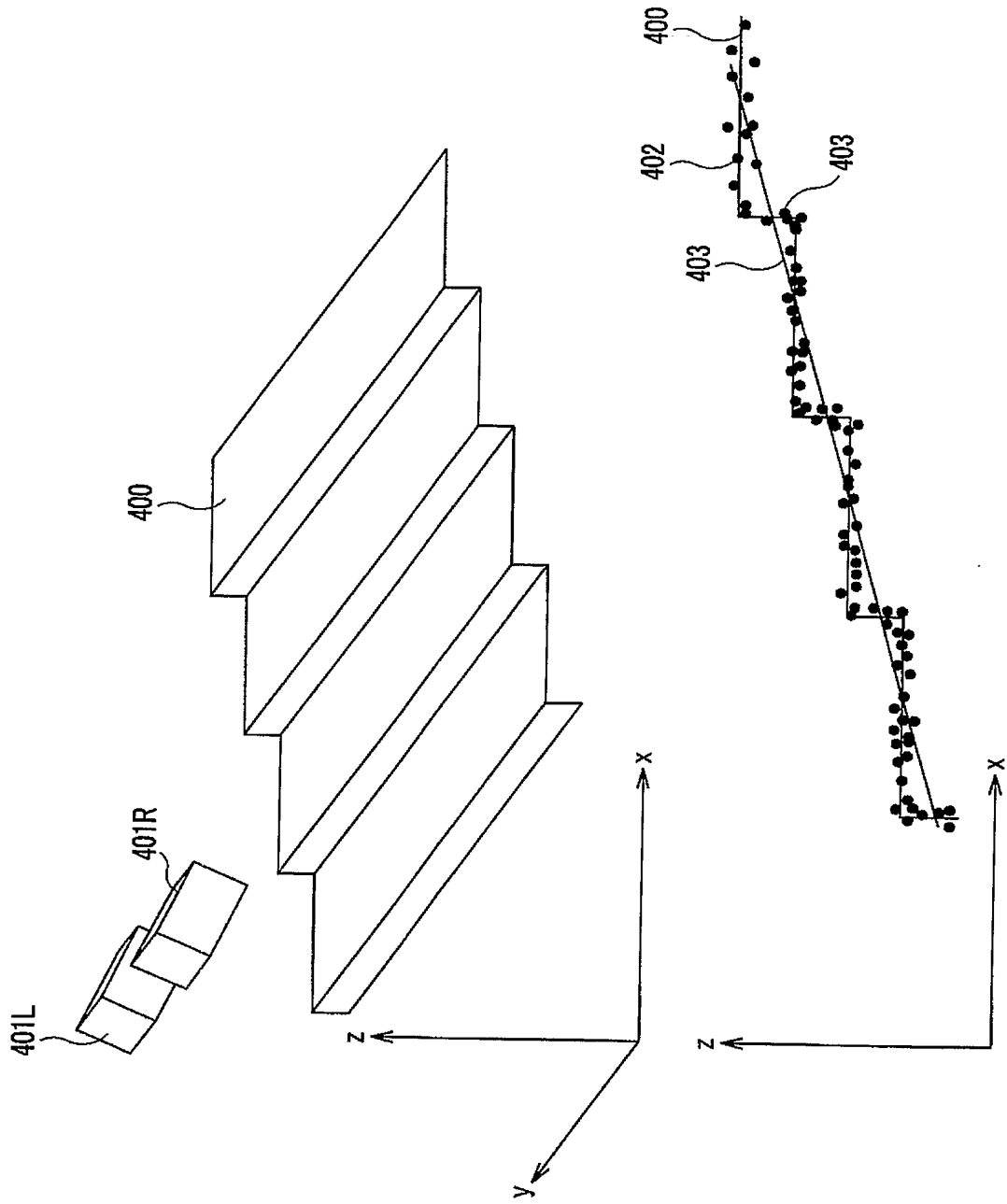
【図 28】



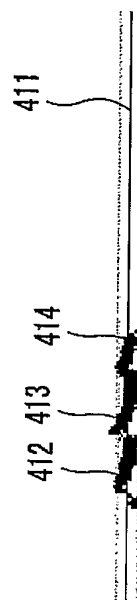
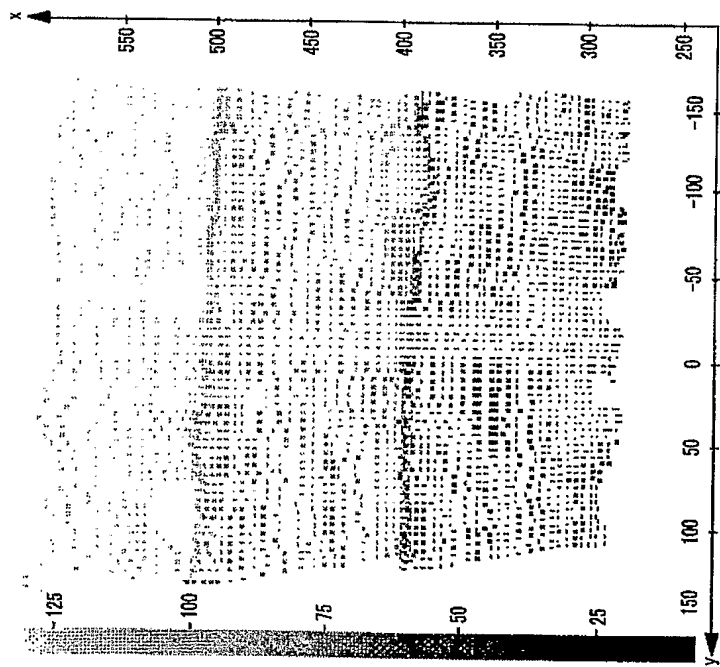
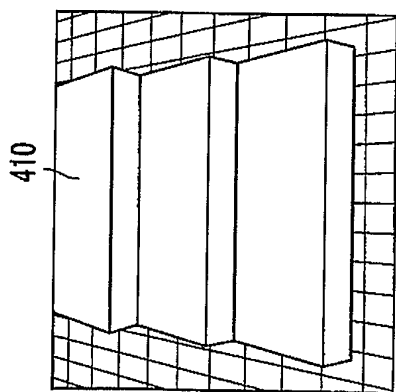
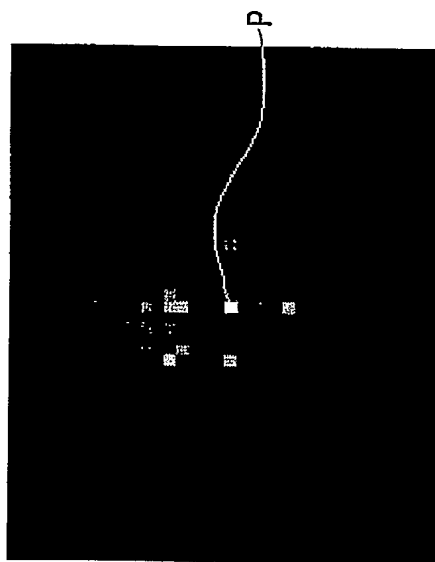
【図 29】



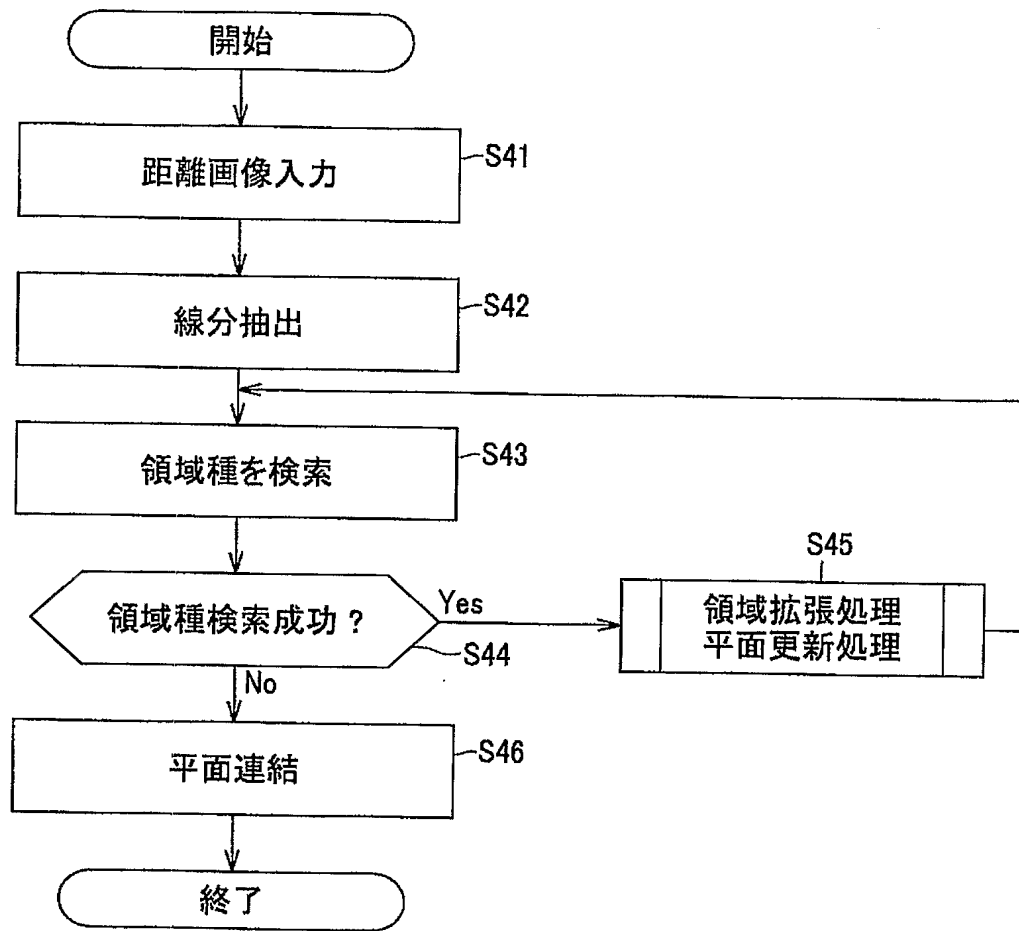
【図 30】



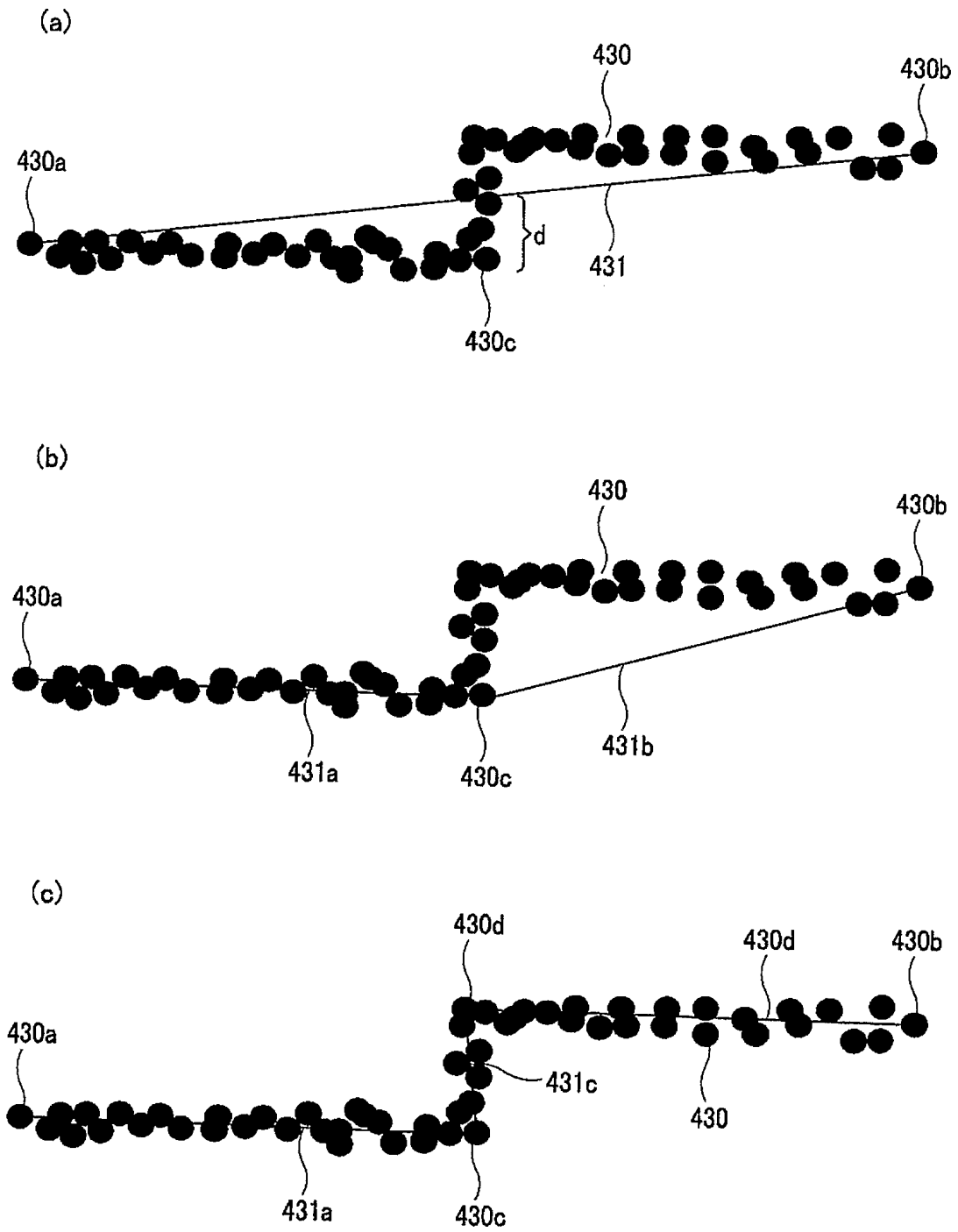
【図 31】



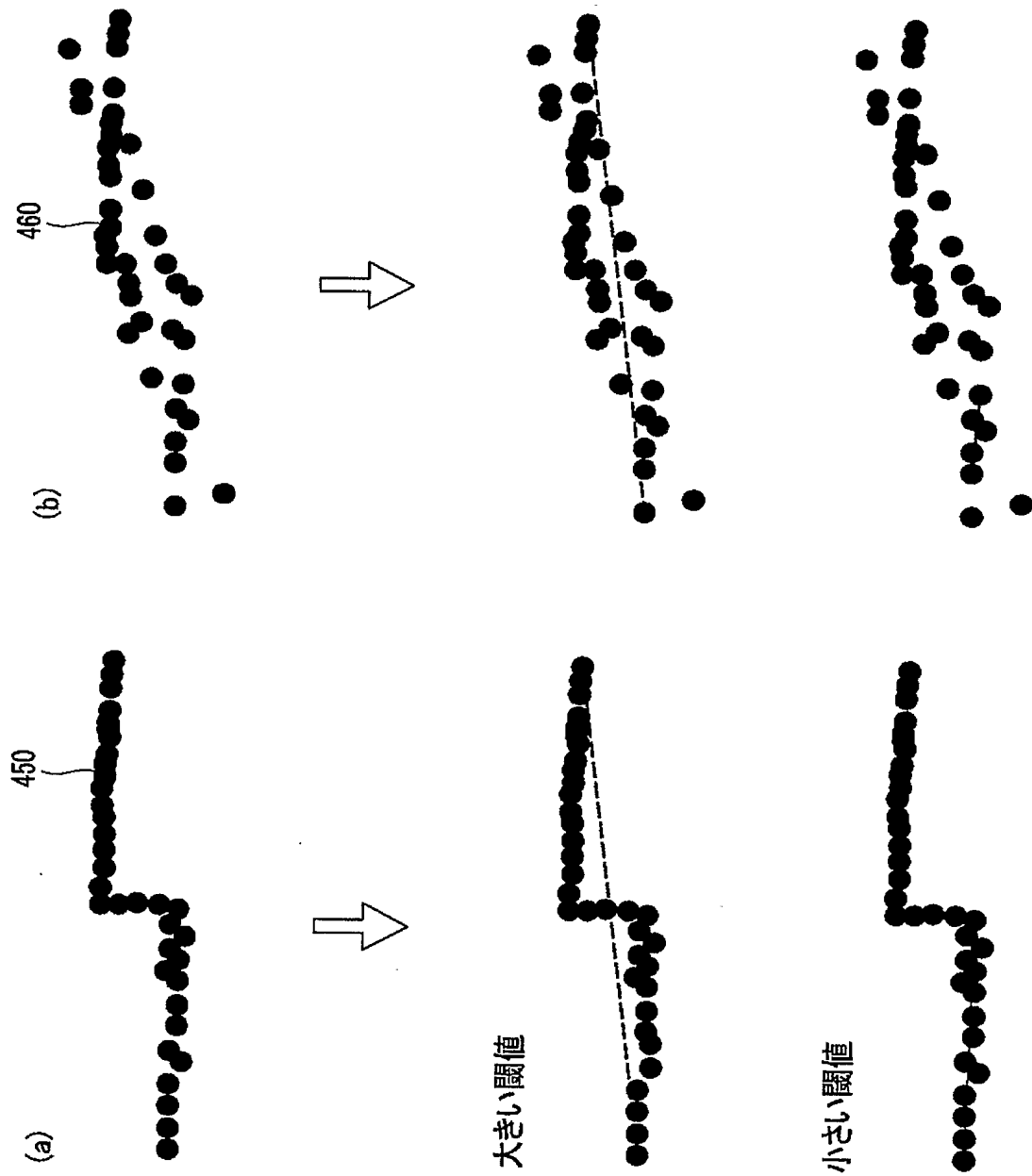
【図 3 2】



【図 33】



【図 34】



## 【書類名】 要約書

## 【要約】

【課題】 計測ノイズを含む距離データからノイズに対してロバストにかつ複数平面を同時に正確に検出する。

【解決手段】 平面検出装置の平面検出部 3 は、画像を構成する距離データ点から同一平面にある距離データ点群を選択し、この距離データ点群から線分を抽出する線分抽出部 4 と、画像内に含まれる、線分抽出部 4 よって抽出された全線分からなる線分群から、該画像内に存在する 1 又は複数の平面領域を検出する領域拡張部 5 とを有する。線分抽出部 4 は、まず、距離データ点群の端点を結ぶ線分  $L_1$  を引き、この線分  $L_1$  との距離が最も大きい着目点  $brk$  を探し、所定の値以上の場合は着目点でデータ点群を分割し、距離が所定の値未満の場合は最小二乗法により線分  $L_2$  を求める。そして線分  $L_2$  の一方の側にデータ点が所定の数以上連続して存在する場合、ジグザグ形と判断し、着目点  $brk$  でデータ点群を分割して、再び以上の処理を繰り返す。

【選択図】 図 1 4



特願 2 0 0 4 - 0 7 7 2 1 5

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[ 0 0 0 0 0 2 1 8 5 ]

1. 変更年月日

1 9 9 0 年 8 月 3 0 日

[変更理由]

新規登録

住 所

東京都品川区北品川 6 丁目 7 番 3 5 号

氏 名

ソニー株式会社